

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ANÁLISE DA INSERÇÃO DA INTERPOLAÇÃO SPLINE NA
MANUFATURA DE MOLDES PARA INJEÇÃO DE PLÁSTICOS

SILVIO JOSÉ CAVALLARI JUNIOR

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUIS HELLENO

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2013

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ANÁLISE DA INSERÇÃO DA INTERPOLAÇÃO SPLINE NA
MANUFATURA DE MOLDES PARA INJEÇÃO DE PLÁSTICOS**

SILVIO JOSÉ CAVALLARI JUNIOR

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUIS HELLENO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2013

ANÁLISE DA INSERÇÃO DA INTERPOLAÇÃO SPLINE NA MANUFATURA DE MOLDES PARA INJEÇÃO DE PLÁSTICOS

SILVIO JOSÉ CAVALLARI JUNIOR

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, em 28 de fevereiro de 2013,
pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

PROF. DR. ANDRÉ LUIS HELLENO, (PRESIDENTE)
PPGP - UNIMEP

PROF^a. DR^a. MARIA CÉLIA DE OLIVEIRA PAPA
PPGP - UNIMEP

PROF. DR. RAFAEL A. MESQUITA
UNINOVE

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus profundos e sinceros agradecimentos:

Primeiramente a **Deus**, pela vida que me concede a cada dia e sua misericórdia infinita, a **Jesus Cristo** pela graça da salvação e perspectivas da vida eterna.

Ao Prof. Dr. André Luis Helleno, pela orientação, a profunda paciência e o incentivo que sempre demonstrou no andamento deste trabalho.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

À minha esposa Márcia da Silva Cavallari, que mesmo privada de minha presença em momentos importantes de sua vida, soube como ninguém compreender e participar comigo desta empreitada.

Ao Sr. Silvio José Cavallari e Sra. Maria Helena Cardoso Cavallari meus queridos pais que sempre estiveram ao meu lado, tendo sempre uma palavra de carinho e incentivo.

A empresa Villares Metals pela doação do material utilizado nos corpos de prova.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão de bolsas de estudos.

"Desde a antiguidade não se ouviu, nem com ouvidos se percebeu, nem com os olhos se viu um Deus além de ti, que trabalhe para aqueles que nele esperam."

(Isaiás 64:4)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS.....	IV
LISTA DE SIGLAS	III
RESUMO	IX
ABSTRACT.....	X
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. IMPORTÂNCIA DO TRABALHO	2
1.2. OBJETIVO	9
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2. MANUFATURA DE MOLDES PARA INJEÇÃO DE PLÁSTICOS	11
2.1. PANORAMA DO MERCADO	11
2.2. PROCESSO DE MANUFATURA DE MOLDES PARA INJEÇÃO DE PLÁSTICOS	16
2.3. CADEIA CAD/CAM/CNC	18
2.3.1. SISTEMA CAD.....	19
2.3.2. SISTEMA CAM	25
2.3.3. INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS CAD/CAM.....	26
2.3.4. SISTEMA CNC	28
2.3.5. MÉTODO DE REPRESENTAÇÃO DA TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA.....	33
2.3.5.1. INTERPOLAÇÃO LINEAR.....	38
2.3.5.2. INTERPOLAÇÃO <i>SPLINE</i>	41
3. MÉTODO DE PESQUISA	45
4. DETALHAMENTO DO MÉTODO DE PESQUISA.....	47
4.1. CORPO DE PROVA	48
4.2. MÁQUINA UTILIZADA NOS ENSAIOS.....	49
4.3. SISTEMA CAD/CAM.....	50
4.4. MEDIÇÃO GEOMÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA.....	51
4.5. DESCRIÇÃO DAS OPERAÇÕES DE USINAGEM.....	54
4.5.1. OPERAÇÃO DE DESBASTE	55
4.5.2. OPERAÇÃO DE PRÉ - ACABAMENTO.....	56
4.5.3. OPERAÇÃO DE ACABAMENTO	57

4.6.	FERRAMENTAL UTILIZADO NOS ENSAIOS.....	59
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
5.1.	TEMPO DE USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA	60
5.2.	EXATIDÃO GEOMÉTRICA.....	62
5.3.	ASPECTO SUPERFICIAL	66
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: IMPORTAÇÃO SEGUNDO O PAÍS DE ORIGEM (ADAPTADO PONCE, 2010).....	2
FIGURA 2: TEMPO DE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO (DANIEL, 2001) (FALLBOHMER ET. AL, 2000).....	4
FIGURA 3: CADEIA CAD/CAM/CNC (MCMAHON E BROWNE, 1999) (SOUZA E ULBRICH, 2009).....	7
FIGURA 4: EVOLUÇÃO DAS MÁQUINAS CNC'S NO BRASIL (ADAPTADO SIMON, 2009).....	14
FIGURA 5: DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS EMPRESAS PESQUISADAS EM 2009 (ADAPTADO SIMON, 2009).	15
FIGURA 6: FLUXOGRAMA PROCESSO DE MANUFATURA DE MOLDES (OLLING, 1999) (CHOI E JERARD, 1998).	17
FIGURA 7: CADEIA CAD / CAM / CNC (ADAPTADO MCMAHON E BRONWE, 1999).....	19
FIGURA 8: SOFTWARE CAD DE GRANDE PORTE	21
FIGURA 9: EDIÇÕES DE UMA SUPERFÍCIE COMPLEXA	23
FIGURA 10: DEMONSTRAÇÃO DE SOFTWARE CAM	25
FIGURA 11: MÉTODOS DE GERAÇÃO DO PROGRAMA NC (ADAPTADO MCMAHON E BRONWE, 1999).....	29
FIGURA 12: FLUXOGRAMA PROGRAMAÇÃO COM ÍNDICE (IDDYN) PARA APROXIMAÇÃO DO TEMPO REAL DE USINAGEM (MONARO E HELLENO, 2010)	32
FIGURA 13: FAIXA DE TOLERÂNCIA E TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA (HELLENO, 2004).....	34
FIGURA 14: TECNOLOGIAS RELACIONADAS AO PROCESSO HSC (SCHULZ, 2003).....	35
FIGURA 15: REPRESENTAÇÃO DA INTERPOLAÇÃO LINEAR.	38
FIGURA 16: LINHAS DE UM PROGRAMA NC EM FORMATO LINEAR	39
FIGURA 17: TOLERÂNCIA CAM NA REPRESENTAÇÃO DA INTERPOLAÇÃO LINEAR (HELLENO, 2004)	39
FIGURA 18: EXEMPLOS DE CURVAS NURBS (ADAPTADO MCMAHON E BRONWE, 1999).....	41
FIGURA 19: REPRESENTAÇÃO DE INTERPOLAÇÃO SPLINE (HELLENO, 2004).....	43
FIGURA 20 LINHAS DE UM PROGRAMA NC EM FORMATO SPLINE	44

FIGURA 21: METODOLOGIA PARA MANUFATURA E INSPEÇÃO DO CORPO DE PROVA	48
FIGURA 22: CORPO DE PROVA.....	48
FIGURA 23: CENTRO DE USINAGEM VERTICAL, MODELO DISCOVERY 760, FABRICADO PELAS INDÚSTRIAS ROMI S.A.....	50
FIGURA 24: MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADA	51
FIGURA 25: PROCEDIMENTO PARA MEDIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	52
FIGURA 26: PLANO DE MEDIÇÃO BASEADO NA VARREDURA POR PONTOS.....	53
FIGURA 27: DESBASTE DOS CORPOS DE PROVA	55
FIGURA 28: PRÉ-ACABAMENTO DOS CORPOS DE PROVA.....	56
FIGURA 29: CORPO DE PROVA APÓS A FINALIZAÇÃO DA USINAGEM.....	57
FIGURA 30: GRAVAÇÃO PARA RASTREABILIDADE.....	58
FIGURA 31: TEMPOS DE USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA	61
FIGURA 32: EXATIDÃO GEOMÉTRICA DO CORPO DE PROVA COM INTERPOLAÇÃO LINEAR	62
FIGURA 33: EXATIDÃO GEOMÉTRICA DO CORPO DE PROVA COM INTERPOLAÇÃO SPLINE	63
FIGURA 34: DESVIO GEOMÉTRICO DO CORPO DE PROVA COM INTERPOLAÇÃO LINEAR	64
FIGURA 35: DESVIO GEOMÉTRICO DO CORPO DE PROVA COM INTERPOLAÇÃO SPLINE	65
FIGURA 36: ASPECTO SUPERFICIAL CORPO DE PROVA USINADO COM A INTERPOLAÇÃO LINEAR.	67
FIGURA 37: ASPECTO SUPERFICIAL CORPO DE PROVA USINADO COM A INTERPOLAÇÃO SPLINE.	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPARATIVA ENTRE MODELAGEM CAD DE SUPERFÍCIES CONVENCIONAIS E MODELAGEM CAD DE SUPERFÍCIES COMPLEXAS.....	24
TABELA 2: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO MATERIAL VP ATLAS (VILLARES, 2012).....	49
TABELA 3: DISTRIBUIÇÃO DAS QUANTIDADES, TIPOS DE INTERPOLAÇÃO E TOLERÂNCIA CAM DOS CORPOS DE PROVA.....	54
TABELA 4: PARÂMETROS DE CORTE DA OPERAÇÃO DE DESBASTE DOS CORPOS DE PROVA	55
TABELA 5: PARÂMETROS DE CORTE DA OPERAÇÃO DE PRÉ-ACABAMENTO	56
TABELA 6: PARÂMETROS DE CORTE DA OPERAÇÃO DE ACABAMENTO	57
TABELA 7: SEQUÊNCIA DAS PEÇAS USINADAS.....	58
TABELA 8: TEMPO DE USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	60

LISTA DE SIGLAS

B-REP	BOUNDARY REPRESENTATION
CAD	COMPUTER AIDED DESIGN
CAM	COMPUTER AIDED MANUFACTURING
CNC	COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO
ERP	ENTERPRISE RESOURCE PLANNING
HSC	HIGH SPEED CUTTING
IDDYN	ÍNDICE DE DESEMPENHO DINÂMICO
NC	NUMERIC CONTROL
NURBS	NON UNIFORM RATIONAL B-SPLINE
PCP	PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

Resumo

A atual competitividade imposta pelo mercado faz com que a demanda por atualizações tecnológicas nas indústrias de bens de consumo ocorra numa velocidade cada vez maior. No processo de manufatura de moldes para injeção de plásticos este aumento de demanda resulta na inserção de novas tecnologias do processo de fabricação voltada para a redução do tempo de usinagem e aumento da qualidade geométrica e superficial dos moldes. Em virtude disso, inúmeras pesquisas tem sido desenvolvidas para a otimização da usinagem na cadeia de moldes para injeção de plásticos por meio da utilização de altas velocidades de avanço e novos métodos para a geração da trajetória da ferramenta de corte. Atualmente, a representação da trajetória da ferramenta de corte é normalmente realizada utilizando segmentos de retas gerados a partir da interação geométrica entre ferramenta de corte sobre o modelo CAD, o que, em um ambiente de usinagem com alta velocidade de avanço, resulta em diversas limitações. Visando a melhoria do processo de fabricação por meio da otimização da trajetória da ferramenta de corte, a utilização de segmentos de curvas *B-Splines* tem sido amplamente estudado no processo de fabricação de moldes para injeção de plásticos. Com isso, este trabalho visa contribuir para a otimização do processo manufatura de moldes para injeção de plásticos por meio da análise comparativa da manufatura de um molde com dois processos de manufatura distintos em função da representação da trajetória da ferramenta utilizando segmentos de retas (Interpolação Linear) e segmentos de curvas *B-Spline* (Interpolação NURBS). Para a análise foi usinado um corpo de prova representado por geometrias normalmente encontradas em um molde plástico. Para cada tipo de Interpolação foram realizadas três repetições. O tempo de usinagem, a exatidão geométrica e o aspecto superficial foram utilizados como parâmetros comparativos, evidenciando as vantagens da Interpolação *Spline* sobre a Interpolação Linear.

Palavras-chave: Interpolação da trajetória da ferramenta, CAD/CAM/CNC, manufatura de moldes para injeção de plásticos.

Abstract

The current competitiveness imposed by the market makes the demand for technology upgrades in the industries of consumer goods occur in increasing speed. In the manufacturing process of plastic injection molds for this increase in demand results in the insertion of new technologies in the manufacturing process aimed at reducing the machining time and increases the quality and geometry of the mold surface. As a result, much research has been developed for the optimization of machining chain molds for plastic injection by using high feed rates and new methods for the generation of the trajectory of the cutting tool. Currently, the representation of the trajectory of the cutting tool is usually performed using line segments generated from the geometric interaction between the cutting tool on the CAD model, which, in a machine environment with high forward speed, results in several limitations . Aiming to improve the manufacturing process by optimizing the trajectory of the cutting tool, the use of segments of curves B-Splines has been widely studied in the process of manufacturing molds for plastic injection. Thus, this work aims to contribute to the optimization of the process of manufacturing molds for plastic injection through the comparative analysis of manufacturing a mold with two distinct manufacturing processes due to the representation of the tool path using line segments (Linear Interpolation) and segments of curves B-Spline (NURBS interpolation). Analysis was machined to a specimen geometries represented by normally encountered in a plastic mold. For each type of interpolation were performed three replications. The machining time, the geometric accuracy and surface appearance were used as comparative parameters, showing the advantages of Spline Interpolation on Linear Interpolation.

Keywords: Interpolation of the tool path, CAD / CAM / CNC manufacturing plastic molds.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a manufatura de moldes para injeção de plásticos sofre forte influência da tendência de produtos com ciclo de vida menor, da redução dos custos de fabricação e do aumento da diversidade.

Para adaptação a essa tendência e para manter o nível de competência global, as empresas envolvidas nessa cadeia produtiva estão buscando desenvolver soluções e inovações tecnológicas para otimizar o processo de manufatura de moldes para injeção de plásticos.

Os principais fatores que constituem o custo de produção dos moldes para injeção de plástico são a usinagem e o acabamento (polimento), sendo que as reduções desse custo são de grande auxílio para que as empresas se tornem competitivas, reduzindo o tempo de retorno dos investimentos e, assim, podendo investir em pesquisa e desenvolvimento. (MESQUITA e BARBOSA, 2005).

Quanto melhor for o acabamento superficial obtido durante a usinagem menor será o tempo gasto em operações de polimento. Uma das consequências de uma usinagem com bom acabamento superficial é o aumento do tempo da operação de acabamento na máquina CNC, resultante da ampliação do trajeto que a ferramenta de corte realiza nessa operação.

O presente trabalho visa analisar a inserção da Interpolação *Spline* na manufatura de moldes para injeção de plástico e verificar seus benefícios em relação à Interpolação Linear.

Neste capítulo, será feita uma descrição da importância deste trabalho para o setor de manufatura de moldes para injeção de plásticos, buscando fazer um levantamento da problemática a ser abordada ao longo desta pesquisa. Em seguida, serão apresentados os objetivos propostos para este projeto e, por fim, uma apresentação da estrutura utilizada.

1.1. IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

Cerca de 70% de todos os produtos manufaturados no mundo são feitos de termoplásticos, sejam eles bens duráveis, ou não. Segundo o instituto de pesquisa LatinPanel, houve no Brasil, um grande aumento de consumo dos produtos não duráveis, em uma comparação feita no período entre 2008 e 2009 (MARSON, 2009).

Apesar de todo esse cenário otimista, o Brasil ainda possui empresas com um parque de máquinas desatualizadas e, nos casos de equipamentos modernos, os programadores de máquinas encontram dificuldades em extrair todos os avanços promovidos pelas máquinas-ferramentas.

O Brasil encontra dificuldades em fornecer seus moldes com baixo custo, prazo e qualidade, que faz com que nossa indústria seja frágil, perdendo para a concorrência dos outros países.

Até o início deste século, os principais países fabricantes de moldes para a injeção de plásticos eram Estados Unidos, Alemanha e Japão. A partir de 2003, os países asiáticos, com um destaque especial para a China, tiveram um grande crescimento nesse cenário, como pode ser observado na Figura 1.

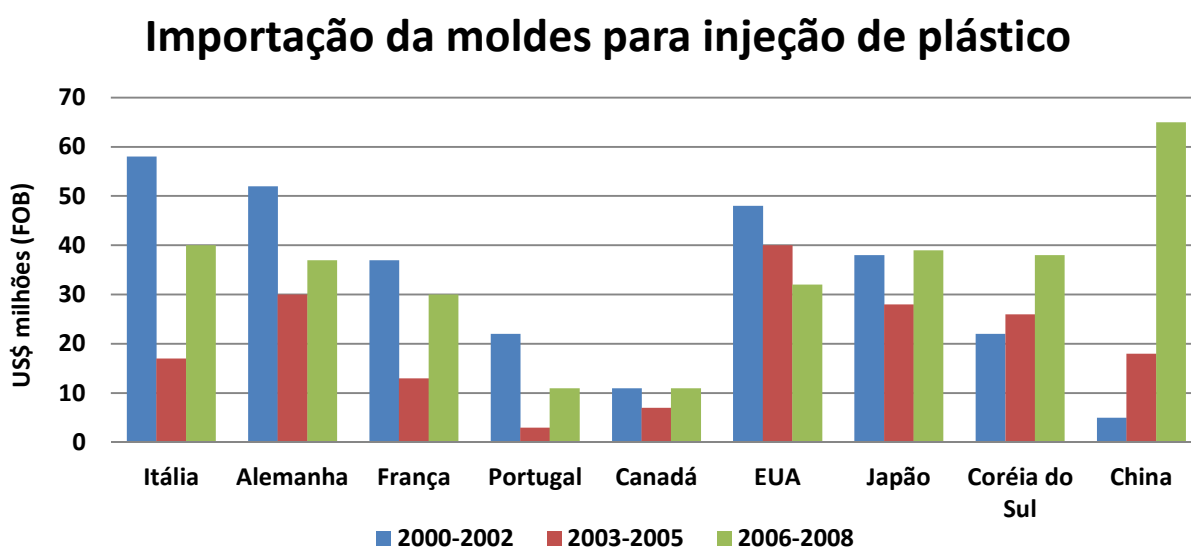


FIGURA 1: IMPORTAÇÃO SEGUNDO O PAÍS DE ORIGEM (ADAPTADO PONCE, 2010)

É importante lembrar que os principais países fabricantes de moldes para injeção de plástico, conforme figura 1, possui em comum a especialização em certos tipos e tamanhos de moldes, ou em mercados regionais, podendo também contar com instituições que dão apoio ao desenvolvimento tecnológico, o que facilita a difusão de informações sobre as melhores cadeias produtivas e gerenciais (PONCE, 2010).

Porém, sem esses recursos técnicos e organizacionais, as empresas brasileiras ainda possuem artifícios para contra-atacar a ofensiva asiática neste setor, isso se as mesmas se especializarem em nichos de mercado e fizerem uma integração da cadeia de todos os elos produtivos, incluindo a cooperação e a troca de informações entre usuários e fornecedores (PONCE, 2010).

O mercado nacional de moldes para injeção de plásticos tornou-se um universo heterogêneo e multifacetado, no qual os fabricantes buscam unidade, para juntos combater a crescente invasão chinesa.

Estimuladas pelo aquecimento das vendas domésticas, as empresas, cada uma à sua maneira, tenta oferecer algo a mais ao cliente, seja com a eficiência da capacidade produtiva ou com investimentos em altas tecnologias.

Contar com equipamentos avançados é uma forma de se diferenciar nesse mercado e conseguir agilidade nos processos, pois quem encomenda moldes de injeção de plásticos exige qualidade elevada, preços reduzidos e prazos de entrega cada vez menores. (PACHIONE, 2010).

O maior tempo gasto na fabricação de produtos plásticos injetados está na manufatura do molde, conforme ilustra a Figura 2. Nessa etapa, estão inclusos processos de usinagem e acabamento manual que são grandes consumidores de tempo de fabricação, pois a baixa qualidade superficial do molde após o processo de usinagem com velocidades convencionais faz-se necessário o acréscimo das etapas de polimento manual, que podem chegar a ser mais demorada do que as próprias operações de usinagem. (MESQUITA e SCHNEIDER 2010).

TEMPO DE DESENVOLVIMENTO DOS PRODUTOS PLÁSTICOS INJETADOS

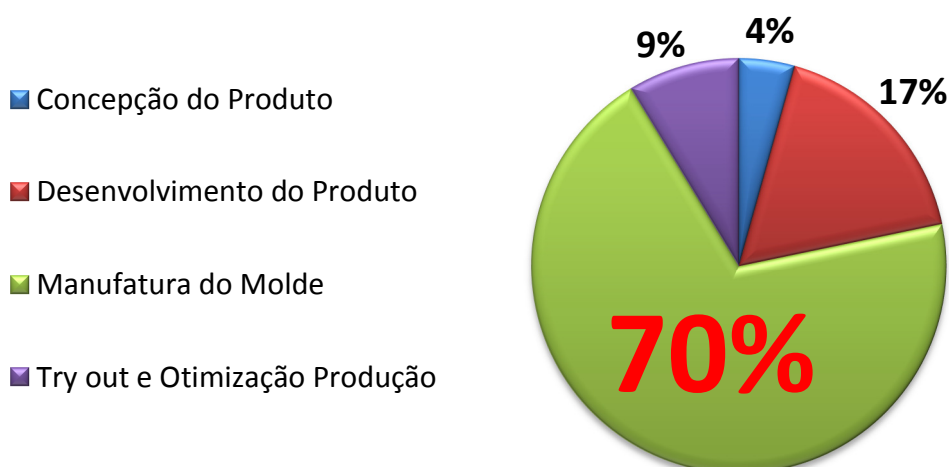


FIGURA 2: TEMPO DE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO (DANIEL, 2001) (FALLBOHMER ET. AL, 2000)

Entre os recursos disponíveis, os sistemas CAM, responsáveis pela geração da trajetória da ferramenta em equipamentos de usinagem, se encontram entre os investimentos de rápido retorno.

Esses sistemas conseguem considerável redução do tempo necessário para realizar as usinagens, e em casos extremos, a economia chega a ser superior a 40% em relação às regulagens feitas de modo direto nas máquinas, proporcionando vantagem considerável, se levar em conta, o elevado custo da hora/máquina (SANT'ANNA, 2010).

Por estes fatores, o investimento em pesquisas e tecnologias voltadas para este setor, deve ser priorizado para que os produtores nacionais possam concorrer com países emergentes, como é o exemplo da China, nos dias atuais.

Além da alta concorrência com os asiáticos, outro grande desafio tecnológico é o aumento da complexidade das formas geométricas dos produtos no decorrer dos anos. Este desafio impõe novas maneiras para a fabricação de produtos com formas geométricas complexas.

Os avanços tecnológicos na manufatura tiveram crescimento a partir da necessidade dos fabricantes em se adequarem ao novo cenário econômico que surgiu nos últimos anos, em que a atualização dos produtos cresceu de uma maneira incalculável e todos os consumidores tendem a acompanhar esse crescimento.

Segundo Gaither e Frazier (2002), os consumidores eram vistos como simples clientes obrigados a aceitar aquilo que lhes era oferecido. Além disso, o cenário era caracterizado pela produção em massa, cuja característica é a lenta renovação de um produto, devido aos gastos com os novos processos e ferramentais, outro fator era que a qualidade era sinônima de altos preços.

Com o processo de globalização, os consumidores passaram a escolher os produtos que julgassem de melhor qualidade e menor preço (RIBEIRO *et al.*, 2003), aumentando assim a busca por novos modelos e tendências globais.

Essas tendências globais impulsionaram o aumento repentino da competitividade e permitiu uma grande evolução no investimento em novos desenvolvimentos tecnológicos. O alto custo e a falta de tecnologia do processo de fabricação de moldes deixaram de ser uma certeza e passaram a ser encarado como uma deficiência que deveria ser melhorada.

Dessa forma, as empresas passaram a se desenvolver com o objetivo de flexibilizar a produção através do atendimento rápido às novas exigências do mercado e redução do tempo e dos custos de todas as etapas do ciclo de desenvolvimento dos produtos.

Dentre as diversas áreas que sofreram com estas mudanças nos últimos anos, estão às empresas de fabricação de moldes para a injeção de plásticos, para atenderem as novas tendências no desenvolvimento do produto com superfícies cada vez mais complexas. Estas empresas tiveram que modernizar todo seu processo produtivo, informatizar todos os setores de desenvolvimento e manufatura, desenvolver novas ferramentas e técnicas de usinagens, novos materiais e novos equipamentos (BEISS *et al.*, 2009; MESQUITA, 2007).

Atualmente, tais superfícies podem ser encontradas em componentes aerodinâmicos aplicados na indústria aeronáutica (pás de turbinas, impulsores, dutos para fluídos dinâmicos, partes aerodinâmicas, etc.), próteses cirúrgicas e componentes com características ópticas (SRIYOTHA *et al*, 2006), ou produtos do setor automobilístico (design do carro, peças, painéis, faróis, etc.) e eletroeletrônico (celulares, filmadoras, etc.) (SAVIO *et al*, 2007) (JIANG *et al*, 2007).

Em função disso, há uma busca por avanços tecnológicos na manufatura de superfícies complexas, principalmente com relação à fabricação de moldes de injeção de plásticos, procurando novas habilidades de manufaturar moldes no menor tempo possível, garantindo qualidade, precisão e redução dos custos do projeto. A maioria dessas pesquisas é realizada pelas indústrias automobilística, aeronáutica e de eletroeletrônicos.

Devido a grande complexidade geométrica, a obtenção de um sistema ideal para a construção dos moldes para injeção de plástico tem demonstrado ser bastante difícil. Os principais problemas encontrados envolvem a usinagem das superfícies complexas, a usinagem de pequenos raios entre cantos, paredes, áreas com profundidade de corte relativamente grande, entre outros fatores desfavoráveis à manufatura (SOUZA, 2004).

Todos esses problemas promoveram a fusão entre profissionais de diferentes áreas do conhecimento que se reúnem para cumprir um objetivo comum, em que a comunicação entre eles foi favorecida pelo uso dos sistemas CAD/CAM/CNC, o qual em pouco tempo tornou-se referencia nas empresas do segmento.

A Figura 3 apresenta um fluxograma das fases da cadeia CAD/CAM/CNC aplicadas na manufatura de superfícies complexas.

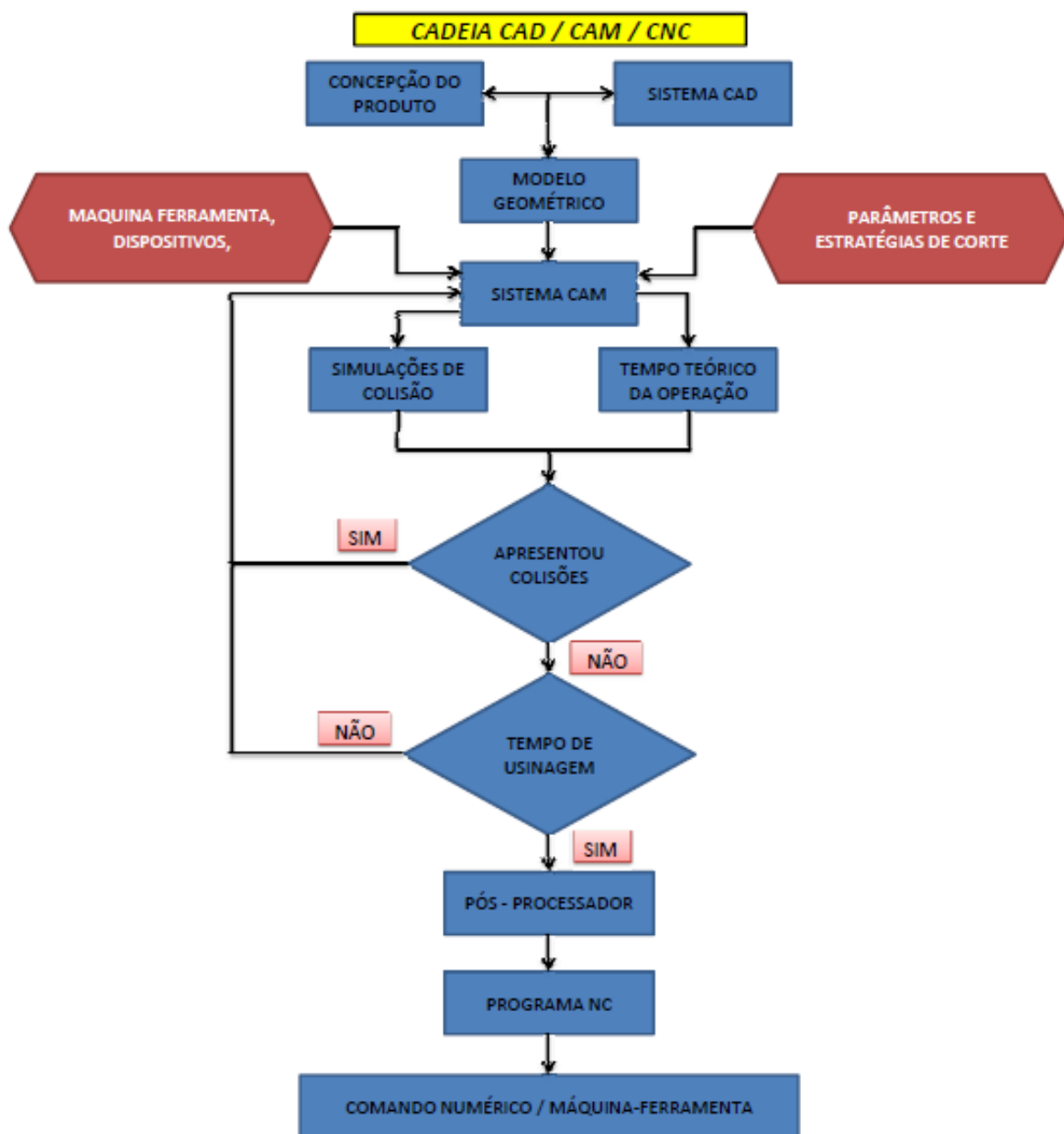


FIGURA 3: CADEIA CAD/CAM/CNC (MCMAHON E BROWNE, 1999) (SOUZA E ULBRICH, 2009)

Pode-se verificar neste fluxograma, que os processos decisórios sobre parâmetros de corte e estratégias de usinagem são determinados através da experiência e conhecimentos do programador CAM. Neste caso, os sistemas CAM fornecem, como indicadores de desempenho, a simulação virtual de colisão do processo de usinagem o tempo de usinagem teórico.

Dentre as variáveis mais expressivas, relacionadas ao tempo e a qualidade de usinagem no processo de arbitramento do programador CAM, destacam a determinação das estratégias de usinagem, uma vez que ela está diretamente relacionada com as características técnicas e geométricas do produto.

Além da inserção da cadeia CAD/CAM/CNC, a Tecnologia HSC (*High Speed Cutting*) é outro avanço tecnológico que teve uma participação fundamental para melhorar a eficiência do processo de manufatura de moldes e matrizes, principalmente no que tange a redução do tempo de fabricação e alta qualidade superficial (SCHULZ, 1996).

O uso de máquinas-ferramenta com esta tecnologia permite taxas de aceleração e desaceleração muito maiores devido ao uso de motores lineares e, também, um tempo de resposta do comando numérico muito menor do que as máquinas convencionais.

As tecnologias já citadas, juntamente com a melhor representação da trajetória da ferramenta utilizada pelo sistema CAM no acabamento da superfície, visam otimizar os processos de usinagem e permitir a produção de peças com superfícies complexas com menor tempo de fabricação, melhor qualidade superficial e maior precisão (HU, 2009).

Essas vantagens agrupadas resultam em menores custos, o que torna essa tecnologia atrativa para todas as indústrias do segmento, pois permite reduzir várias etapas do processo. Em alguns casos, eliminam processos de eletroerosão em cantos e raios de pequeno tamanho, diminuem ou podem até eliminar o processo de pré - acabamento, facilitando o processo de polimento (PESSOLES, 2010).

Atualmente, existem poucos estudos sobre os impactos do método de representação da trajetória da ferramenta utilizada pelo sistema CAM no acabamento de moldes para injeção de plástico.

Este trabalho irá analisar a inserção da Interpolação *Spline* na manufatura de moldes para injeção de plástico e verificar seus benefícios em relação à Interpolação Linear, concluindo as vantagens desse conceito.

1.2. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é analisar a inserção da Interpolação *Spline* na manufatura de moldes para injeção de plástico e verificar seus benefícios em relação à Interpolação Linear.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Comparar os resultados da Interpolação *Spline* e Interpolação Linear no acabamento de uma superfície similar a uma cavidade de um molde para injeção de plástico.
- Comprovar a melhor metodologia de interpolação da ferramenta (Linear ou *Spline*), analisando o tempo de usinagem, exatidão geométrica e aspecto superficial.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução – É feita uma introdução cuja finalidade é situar o tema dentro do contexto atual, definir a importância do trabalho, objetivo geral e específico e justificar a pertinência da proposta de pesquisa.

Capítulo 2 – Manufatura de Moldes para injeção de plásticos – Revisão Bibliográfica sobre o panorama do mercado nacional de fabricação de moldes, ciclos de desenvolvimentos de moldes para injeção de plásticos e elementos que compõem a cadeia CAD/CAM/CNC, dando ênfase aos tipos de interpolação *Spline* e Linear.

Capítulo 3 – Método de Pesquisa – Descrição da metodologia de pesquisa abordada e como os objetivos propostos serão atingidos.

Capítulo 4 – Detalhamento do Método de Pesquisa – Descrição detalhada dos experimentos, corpo de prova, processos de fabricação e sistema de medição utilizado.

Capítulo 5 – Resultados e Discussões – Análise dos resultados obtidos com os experimentos de usinagem e medição dos corpos de prova.

Capítulo 6 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros – Conclusões dos resultados obtidos através da análise de tempos de usinagem e medições, e sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 7 – Referencias Bibliográfica – Lista de referências bibliográficas utilizadas na realização deste trabalho.

2. MANUFATURA DE MOLDES PARA INJEÇÃO DE PLÁSTICOS

Este capítulo apresenta as principais questões teóricas sobre a manufatura de moldes para injeção de plásticos, que envolve a cadeia CAD/CAM/CNC.

Inicialmente este capítulo descreve, de maneira geral, o panorama do mercado nacional de moldes e matrizes, evidenciando a evolução das máquinas CNC's dentro indústrias do segmento metalúrgico.

Em seguida, este capítulo descreve todo o ciclo de fabricação dos moldes para injeção de plásticos nas indústrias de manufatura, abordando as principais etapas e suas respectivas características.

Finalmente, apresenta-se a integração dos sistemas CAD/CAM/CNC, fazendo uma analogia em cada um desses sistemas independentes e depois retratando os principais benefícios da integração dentro da cadeia de manufatura, atribuindo ênfase nos dois principais tipos de interpolação e suas principais características.

2.1. PANORAMA DO MERCADO

Atualmente as empresas do segmento de moldes para a injeção de plástico sofrem diferentes exigências para realizar seus produtos e atingir os requisitos de seus clientes, que cada vez mais se encontram desafiantes. O mercado se apresenta mais competitivo, a inovação e a criação são feitas mais rapidamente, recursos técnicos, capacitação de pessoal, produtos com requisitos funcionais e outros itens inerentes ao sistema de produção com qualidade estão na busca das empresas para se conservarem competitivas no mercado (Werner, 2000).

O setor de desenvolvimento de produtos atualmente é impulsionado a colocar novidades no mercado com velocidade cada vez maior, além de esforçar-se mais para alcançar a vantagem competitiva em relação aos concorrentes (BESANKO, 2004).

Para que exista o progresso entre as empresas que disputam o mercado de inovação, torna-se necessário um grande investimento em tecnologia e longo período de experiência entre os envolvidos. Por isso, essas empresas sofrem altos impactos pelas oscilações do mercado e necessitam da integração entre os sistemas para o controle das constantes modificações do mercado que os sustenta. (SOUZA, 2003).

Essas mudanças de mercado impõem a distribuição de recursos da produção de forma dinâmica e flexível, à vista que para a eficácia do processo, o mesmo precisa ser cumprido de maneira integrada (SOUZA, 2003).

Essa metodologia de integração nos sistemas de apoio ao desenvolvimento de produtos sofreu alteração a partir das décadas de 50 e 60, com a evolução respectiva da máquina NC e do computador, fazendo com que os moldes para injeção de plásticos feitos pelo artesão fossem representados digitalmente por meio de pontos capturados numa máquina de medição por coordenadas. Nasceram então os sistemas de interpolação através de modelos matemáticos, gerando superfícies e sendo transmitidos para a máquina por meio de programas NC (CHOI, 1998).

Outro fator altamente influenciado pelo avanço das tecnologias computacionais foi o sistema de informação dentro da cadeia de desenvolvimento de moldes para injeção de plásticos, em que a tomada de decisão em cada fase do processo passou a desenvolverem-se de maneira integrada.

Esta mudança minimizou o fluxo de informação, ciclos de retrabalho e outros esforços desperdiçados, que são fatores que aumentam o tempo dos processos e conseqüentemente seus custos. Entre as ferramentas computacionais mais utilizadas no mercado em questão, estão os sistemas CAD/CAM/CNC, que quando incorporados em produtos ou processos propiciam agilidade e automatização em seu desenvolvimento, aumentando o rendimento e eficiência das máquinas envolvidas no processo. (ZHIGANG, 2010)

Devido à eficácia alcançada pelo avanço das tecnologias computacionais, vários segmentos metalúrgicos foram influenciados. O segmento de ferramentarias de moldes para injeção de plásticos se favorecem com o emprego destes sistemas de auxílio à produção. Essas ferramentarias contam com os sistemas CAD/CAM e máquinas-ferramenta CNC's para fazer frente à alta demanda por novos moldes e suas formas cada vez mais complexas, sendo atualmente requisitos obrigatórios nas empresas e base para qualquer tecnologia aplicada neste segmento.

O processo tradicional usado na manufatura de moldes de injeção plásticos pode ser dividido entre as seguintes etapas: o design do molde (incluindo modificação e transferência de sua geometria), geração da trajetória da ferramenta, desbaste do bloco do molde e/ou do eletrodo de eletroerosão, acabamento e quando necessário o semi-acabamento do molde, acabamento manual (polimento), e teste final. Entre todas essas etapas, na manufatura de moldes para injeção de plásticos uma grande fatia do tempo total de desenvolvimento é gasta nas operações de acabamento e polimento. Estas operações representam 2/3 do total de custos de manufatura de um molde.

Devido a esse fato, qualquer esforço para aumentar a produtividade e reduzir os custos na manufatura dos moldes deve ter como objetivo reduzir o tempo envolvido nas operações de acabamento e polimento. No entanto, para se encontrar o melhor método de usinagem é necessário fazer uma análise do mercado de moldes e matrizes, levar em consideração todos os fatores relacionados à manufatura e a estrutura das empresas no cenário nacional.

Segundo Simon (2009), é possível verificar a evolução das máquinas CNC's no Brasil entre os anos 1992 a 2009. A figura 4 representa essa evolução.

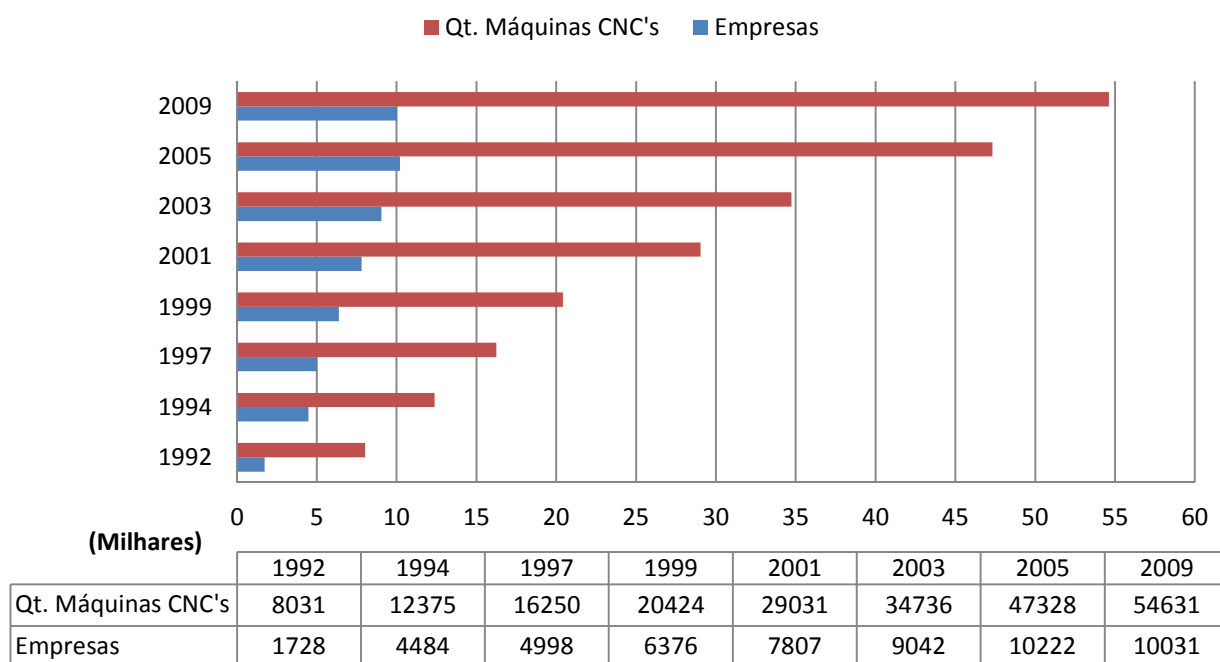


FIGURA 4: EVOLUÇÃO DAS MÁQUINAS CNC'S NO BRASIL (ADAPTADO SIMON, 2009)

A figura 4 destaca as seguintes características:

- O universo de empresas nesta pesquisa nos últimos anos foi superior a 10.000 empresas, sendo que a quantidade de máquinas inventariadas ultrapassou a marca de 50.000.
- Houve o aumento de seis vezes mais máquinas CNC's no Brasil entre os anos 1992 e 2009.

Na pesquisa referente ao ano de 2009, as empresas com até 50 funcionários predominaram, com 70,1%. As empresas pesquisadas com 51 a 100 funcionários foram 10,4%. Já as empresas com 101 a 500 funcionários, foram 19,5%.

A distribuição geográfica das empresas pesquisadas em 2009 teve seu foco Estado de São Paulo, em que existe o maior Polo Metal Mecânico do Brasil, conforme figura 5.

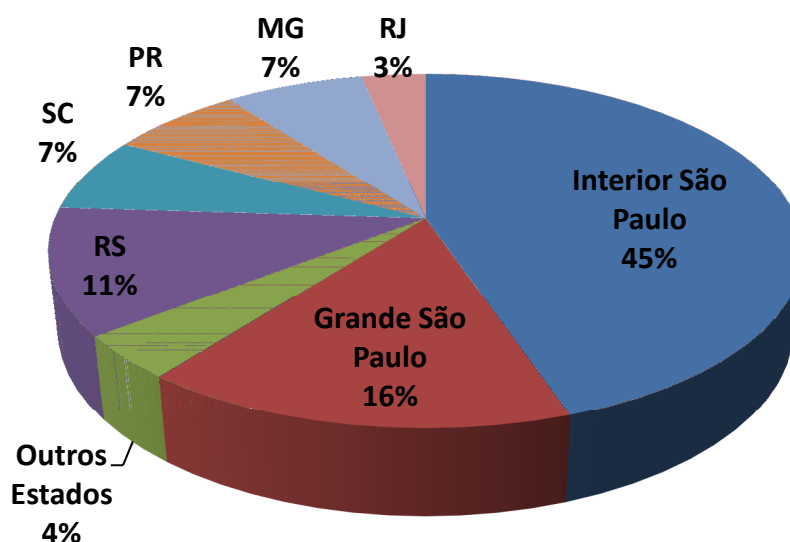


FIGURA 5: DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS EMPRESAS PESQUISADAS EM 2009 (ADAPTADO SIMON, 2009).

De acordo com a pesquisa, os investimentos feitos em máquinas foram maiores em 2005 do que em 2009. No início de 2009, foram compradas 3693 máquinas e em 2005 foram compradas 3992 máquinas.

As empresas analisadas também registraram preferência por máquinas-ferramenta nacionais, as compras em 2009 de máquinas nacionais foram 1239 enquanto as importadas foram apenas 665. O mesmo ocorreu em 2005, em que teve-se também uma maior compra de máquinas nacionais.

Esses dados refletem o bom momento pelo qual o país está passando após recuperação da crise financeira mundial entre o 2008 e 2009. Em 2011, o segmento de máquinas-ferramenta apresentou faturamento bruto de R\$ 1,5 bilhão (FEIMAFE, 2013).

Todos esses investimentos indicam o crescimento do mercado de moldes para a injeção de plástico, caracterizando sua automação e integração em toda a cadeia, desde a concepção do projeto até o try out e liberação para a produção seriada.

2.2. PROCESSO DE MANUFATURA DE MOLDES PARA INJEÇÃO DE PLÁSTICOS

A economia e inovação da usinagem em superfícies complexas, formas geométricas que representam as cavidades dos moldes para injeção de plástico, tem sido um campo muito pesquisado nos últimos tempos.

A exigência do mercado resulta na busca por um processo de manufatura ideal, onde as etapas do processo devem ser otimizadas e a qualidade final do molde deve ser mantida, obrigando as empresas investir em tecnologia e parcerias com as universidades.

Para responder a essas exigências, todas as interfaces das etapas do processo de manufatura em superfícies complexas devem ser tratadas com atenção especial. Faz-se necessário então um estreitamento cada vez maior das funções de projeto, planejamento e fabricação, visando à integridade dos aspectos do produto, dos processos de produção e das operações factíveis nos ambientes de manufatura (ALTAN, 2001).

Para a manufatura dessas superfícies, existem diversos processos que podem ser utilizados. As capacidades destes processos têm sido melhoradas devido às inúmeras pesquisas que vêm sendo realizadas neste setor, como por exemplo, as pesquisas de (BRECHER *et al.*, 2006) (BRINKSMEIER; AUTSCHBACH, 2004) e (LASEMI *et al.*, 2010).

O processo de manufatura de moldes para injeção de plásticos apresenta um conceito tradicional, em que as etapas devem acontecer de maneira consecutiva, sendo iniciada no modelamento do produto e do molde, posteriormente deve-se planejar e executar o processo de manufatura, realizar a inspeção geométrica do molde após a usinagem e polimento e finalizar o processo validando o molde para os testes de produção.

As principais etapas da manufatura de moldes para injeção de plásticos estão indicadas no fluxograma da Figura 6.

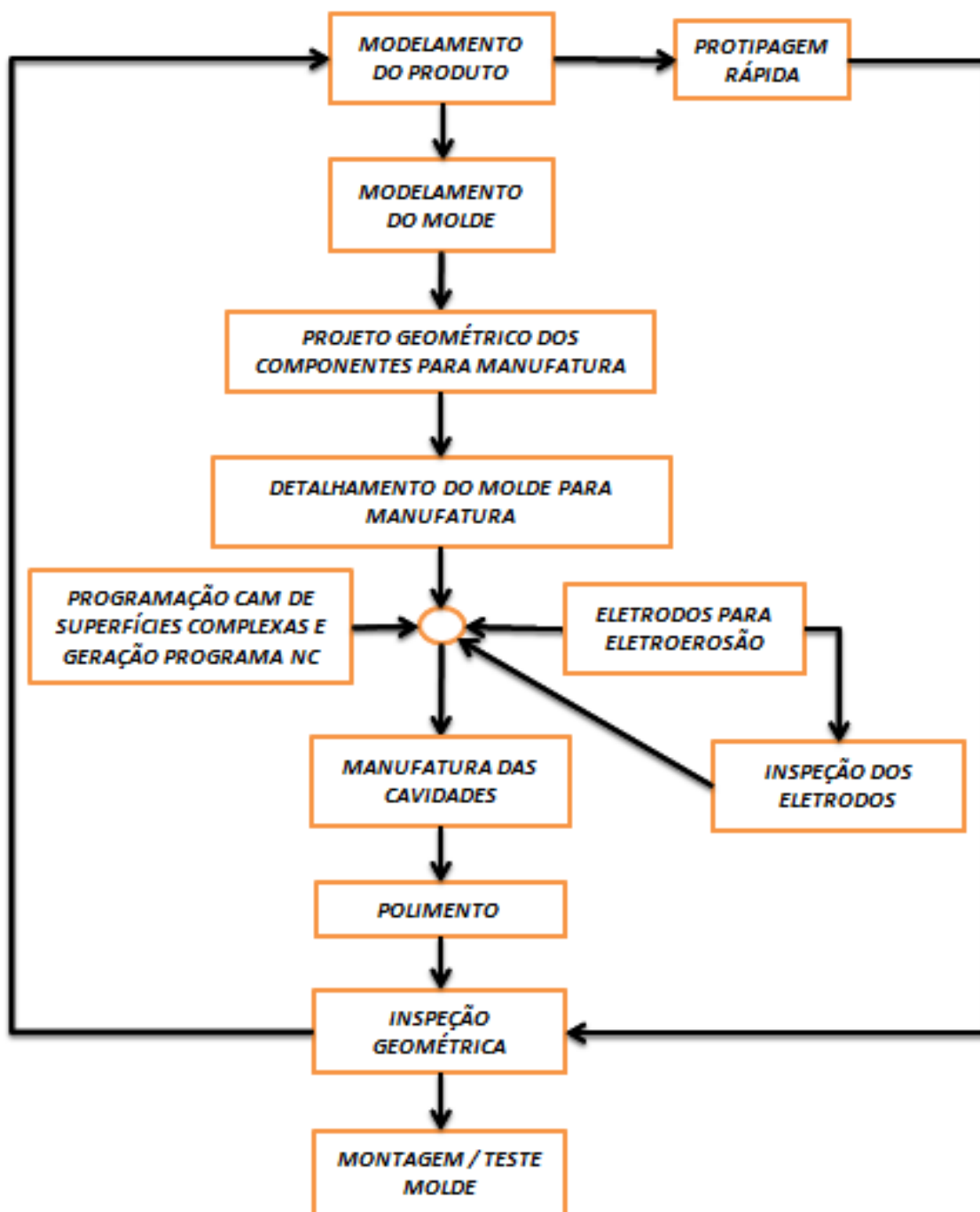


FIGURA 6: FLUXOGRAMA PROCESSO DE MANUFATURA DE MOLDES (OLLING, 1999) (CHOI E JERARD, 1998).

Essas etapas se desenvolvem progressivamente através do uso de tecnologias computacionais, CAD/CAM/CNC, e gerenciais, ERP/PCP, que visam melhorar

a efetividade da organização, reduzindo o tempo gasto nos setores da manufatura e nas suas interfaces.

2.3. CADEIA CAD/CAM/CNC

A busca por excelência na fabricação de moldes para injeção de plásticos, resultou no desenvolvimento da cadeia CAD/CAM/CNC, que por sua vez se tornou referência nesse segmento (YOUJIANG et al, 2010) (BRINKSMEIER e AUTSCHBACH, 2004).

O fluxo de informações dessa cadeia normalmente se inicia com a construção de um modelo geométrico no sistema CAD, em que são inseridos todos os requisitos técnicos do produto, e na sequência, transferidos para o sistema CAM.

Nessa etapa, o sistema necessita receber os dados referentes à manufatura, tais como: dimensão do bloco de aço (matéria prima), dispositivos de fixação, ferramentas de usinagem, estratégias de usinagem e parâmetros de corte, para que o sistema calcule a trajetória da ferramenta e gere um arquivo nativo, conhecido como CLDATA que contém apenas o percurso da ferramenta representado por coordenadas no plano cartesiano (MCMAHON; BROWNE, 1999).

A etapa final no sistema CAM é marcada pela compilação de todas as informações fornecidas pelo processista, em que é gerado o programa NC que será enviado à máquina-ferramenta na qual será feita a usinagem do sólido geométrico criado.

Os softwares CAM contêm um módulo adicional integrado ao sistema, conhecido como pós-processador, que é o responsável por transformar o arquivo nativo em programa NC, contendo a linguagem apropriada para o CNC da máquina-ferramenta (YE et al, 2008).

A Figura 7 é um exemplo de aplicação na indústria de moldes e matrizes, da integração do ciclo CAD/CAM/CAM na manufatura.

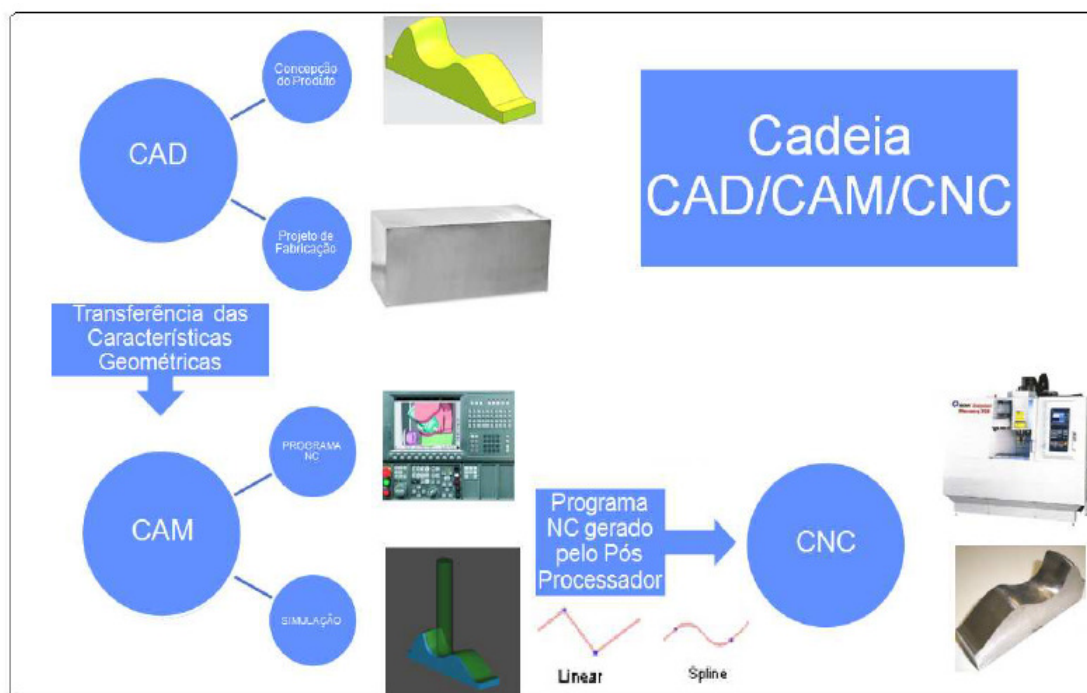


FIGURA 7: CADEIA CAD / CAM / CNC (ADAPTADO MCMAHON E BRONWE, 1999)

2.3.1. SISTEMA CAD

Desenho assistido por computador ou *Computer-Aided Design* (CAD), significa o nome genérico de sistemas computacionais utilizados pela arquitetura, engenharia e design para facilitar o projeto e desenhos técnicos.

Os primeiros registros da utilização de computadores para auxiliar na elaboração dos desenhos técnicos datam da década de 50, quando era possível apenas criar e manipular desenhos em duas dimensões. Foi na década de 70 que foi desenvolvido um sistema CAD, no qual era possível à representação de objetos tridimensionais.

Nos dias de hoje, um *software* CAD é representado como uma ferramenta vital para a indústria, permitindo a geração de desenhos 2D e 3D (COELHO; SOUZA, 2003). As principais características dos softwares CAD são:

- Funções paramétricas 3D para modelação de sólidos;

- Modelação de superfícies;
- Desenhos automáticos de conjuntos de peças;
- Reutilização de *design* de componentes;
- Facilidade na modificação do *design* do modelo e produção de múltiplas versões;
- Validação/verificação dos *designs* de encontro às especificações e regras determinadas;
- Simulação de designs sem a necessidade do protótipo físico;
- Criação de documentação de engenharia, tal como desenhos para maquinação, listas de materiais;
- Importação/Exportação de dados com outros formatos de diferentes programas;
- Saída de modelos diretamente para a fabricação;
- Manter bibliotecas de peças e conjuntos criados;
- Calcular as propriedades de massa de peças e conjuntos;
- Verificação de cinemáticas e interferências em conjuntos de peças

Estas características podem ser encontradas em uma grande variedade de *softwares* CAD existentes no mercado atualmente. Os sistemas CAD são classificados de acordo com a sua utilização e podem ser de pequeno, médio ou grande porte.

O sistema CAD de pequeno porte é o que apresenta menor custo e permite apenas a modelagem em duas dimensões. Já o sistema CAD de médio porte

apresenta como principal característica a representação de objetos tridimensionais, além da possibilidade de comunicação com outros *softwares*.

Com a grande ascensão do uso dos sistemas CAD de médio porte, iniciou-se algumas novas etapas de desenvolvimento do produto, que são:

- Utilização de parâmetros para representar todas as dimensões do produto criado. Assim, qualquer alteração pode ser feita de maneira mais rápida e eficiente;
- Geração de desenhos 2D a partir de um modelo tridimensional e atualização automática do desenho, quando é feita alguma alteração no modelo tridimensional.

O sistema CAD de grande porte utiliza todos os recursos das classes anteriores, além da integração de módulos como o CAM, CAE e CNC, conforme ilustra a Figura 8.

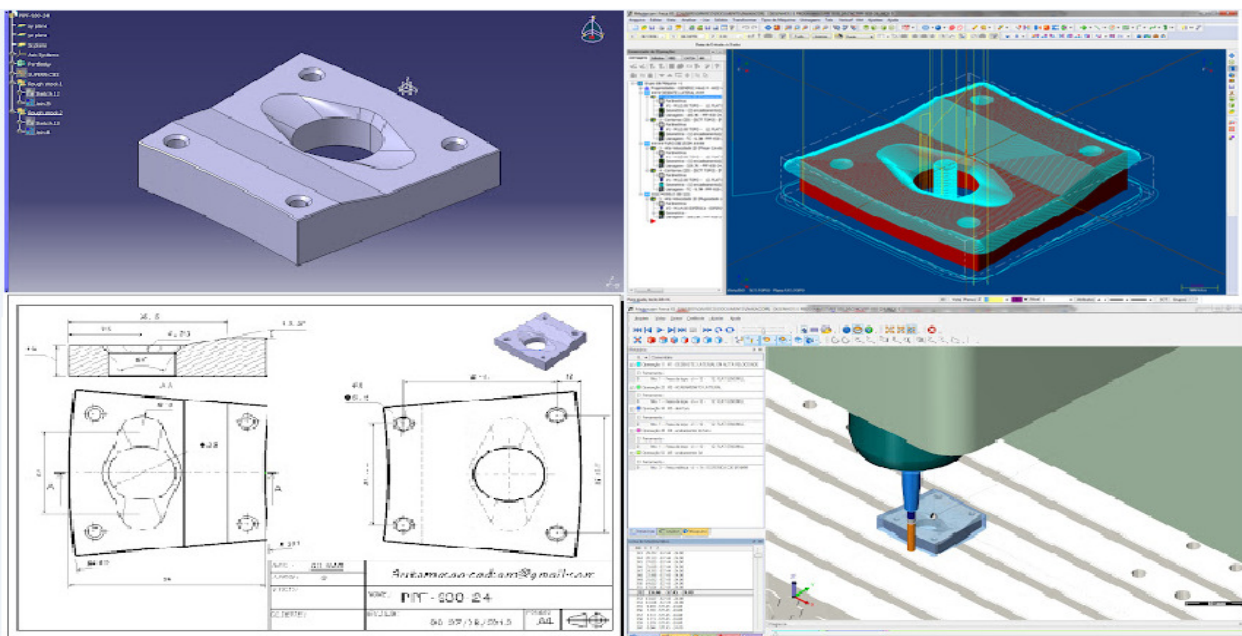


FIGURA 8: SOFTWARE CAD DE GRANDE PORTE

A modelagem geométrica por sólidos concentra-se na representação dos aspectos estruturais do produto (MIN-HO, et al, 2009). Os sistemas que fazem uso deste tipo de modelador são capazes de gerar objetos tridimensionais,

através da utilização de ferramentas para construção de entidades geométricas planas (como linhas, curvas, polígonos) ou mesmo objetos tridimensionais (cubos, esferas, etc.). Também disponibilizam ferramentas para relacionar essas entidades, por exemplo: criar um arredondamento (filete) entre duas linhas ou subtrair as formas de dois objetos tridimensionais para obter um terceiro.

As geometrias dos sólidos utilizando modeladores CAD podem ser representadas de diversas formas. Segundo McMahon e Bronwe (1999) e Souza e Ulbrich (2009) as representações mais comuns são:

- Modeladores B-Rep (*Boundary Representation*): representam a geometria e as relações topológicas entre as várias entidades de um sólido;
- Modeladores CSG (*Constructive Solid Geometry*): representam a geometria através de operações booleanas e de transformações geométricas que podem ser de rotação e translação dos sólidos primitivos utilizados no desenvolvimento do modelo;

A classe de sistemas CAD que utiliza modeladores de superfícies emprega formulações matemáticas complexas, conhecidas como funções *Spline* (MCMAHON e BROWNE, 1999) (PIEGL e TILLER, 1997) (ROGERS, 2001) (SOUZA e COELHO, 2003).

Com a utilização de funções *Spline* é possível à modulação de formas geométricas complexas que não possuem espessura, ou seja, são apenas superfícies em que qualquer ponto do polígono de controle pode ser editado para alterar a forma desta superfície e manter o objeto tridimensional, como pode ser observado na Figura 9.

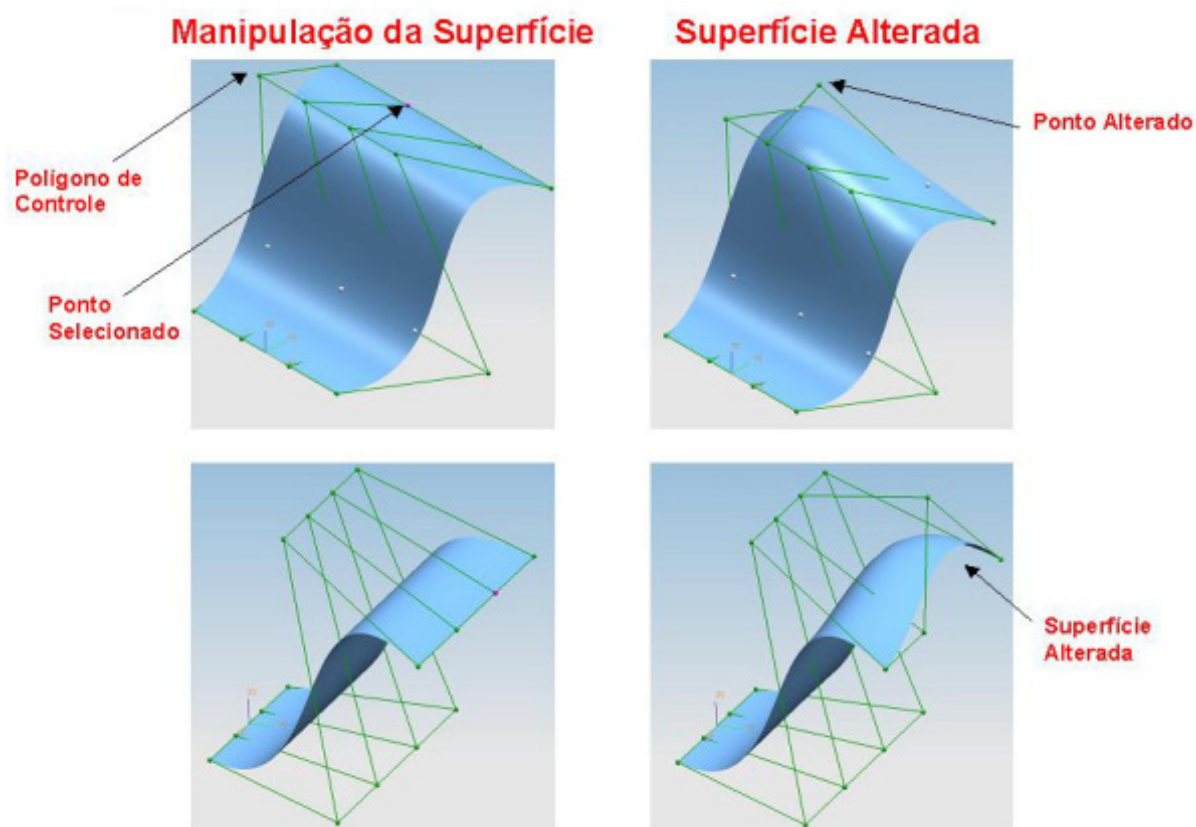


FIGURA 9: EDIÇÕES DE UMA SUPERFÍCIE COMPLEXA

Para o modelamento de superfícies é necessário utilizar curvas obtidas por meio de modelos matemáticos e, apesar dos primeiros modelos matemáticos terem sido os modelos de Lagrange e Hermite, sua aplicação num sistema CAD iniciou-se em 1972 com o francês Paul Bézier, que utilizou um modelo matemático no sistema CAD Unisurf para representar formas complexas de um painel de carro produzidas pela empresa na qual ele trabalhava, a companhia francesa de automóvel Renault (MAHON, 1993) (BEDWORTH, 1991).

O modelo inicialmente proposto por Bézier sofreu algumas alterações durante os anos, dando origem a outros modelos matemáticos como B-Spline e mais recentemente NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline).

Estas alterações proporcionaram aos modelos um melhor controle e manipulação da curva, o que permite uma melhor representação de superfícies complexas.

Existem vários tipos de *softwares* CAD no mercado, o principal e mundialmente conhecido é o AutoCad, que foi um dos softwares pioneiros no setor de projetos mecânicos.

Na atualidade, para acompanhar a complexidade dos novos produtos, houve o desenvolvimento dos softwares CAD, ampliando suas capacidades e seus recursos. No mercado nacional, os *softwares* mais utilizados no desenvolvimento de produtos são o SolidWorks, SolidEdge, Catia, Unigraphics NX, Pro-Engineer e Inventor, além de softwares específicos para todas as engenharias.

Cada tipo de sistemas CAD possui características específicas, podendo realizar modelagens de superfícies convencionais e superfícies complexas. A tabela 1 mostra um comparativo entre as vantagens da modelagem de superfícies convencionais e modelagem de superfícies complexas.

TABELA 1: COMPARATIVA ENTRE MODELAGEM CAD DE SUPERFÍCIES CONVENCIONAIS E MODELAGEM CAD DE SUPERFÍCIES COMPLEXAS.

<i>Modelagem de Superfícies Convencionais</i>	<i>Modelagem de Superfícies Complexas</i>
Fácil de aprender e utilizar	Complexidade em aprender e utilizar
Dificuldade em criação de modelos complexos	Maior flexibilidade na criação de modelos complexos
Capacidade de parametrização e associatividade de modelos geométricos	Capacidade de associatividade e de montagem interativa
Rápida criação de conjuntos montados	Rápida criação de modelos complexos
Excelente para a criação de modelos funcionais	Excelente para a criação de modelos ergonômicos, estéticos ou de forma complexa.

2.3.2. SISTEMA CAM

A Manufatura Auxiliada por Computador ou *Computer-Aided Manufacturing* (CAM), está interligada exclusivamente com o processo de manufatura. Qualquer processo auxiliado por microcontrolador ou controlador numérico pode ser programado por um sistema CAM, como os tornos CNC, centros de usinagem, mandrilhadoras CNC, etc.

A figura 10 representa um sistema CAM, em seu modulo de simulação, o qual é possível reduzir custos de preparação, erros na geração de programas, colisões e tempos de fabricação.

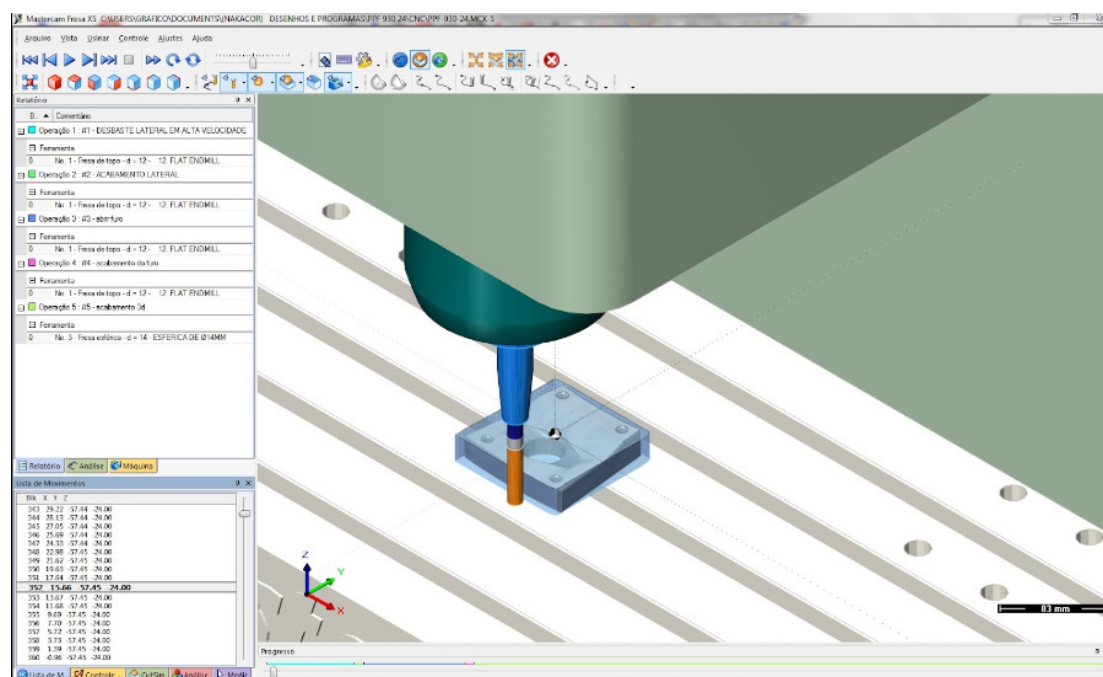


FIGURA 10: DEMONSTRAÇÃO DE SOFTWARE CAM

Dentre todos os processos de fabricação em que a tecnologia CAM é aplicável, é na usinagem por fresamento que este sistema tem se destacado, pois, neste processo, as movimentações da ferramenta de corte são, muitas vezes, complexas, exigindo recursos computacionais para calculá-las (SOUZA e ULBRICH, 2009).

Na fabricação de moldes para injeção de plástico esse sistema se tornou indispensável e o profissional que conhecer os melhores recursos do sistema pode reduzir o tempo de fabricação e aumentar a qualidade dos moldes (BRECHER *et al.*, 2006).

Para realizar a programação, o sistema CAM necessita, inicialmente, de um sólido construído em CAD, o qual a partir desse sólido, todas as trajetórias das ferramentas serão representadas.

Após o recebimento do produto modelado, o programador CAM começa a inserir informações fundamentais à manufatura do produto, tais como: estratégia de operação, parâmetros de corte e especificações tecnológicas.

Depois de inseridas todas as informações da fabricação do produto, o programador fará a conversão da linguagem CLDATA (*Cutter Location Data File*) que contém apenas o percurso da ferramenta representado por coordenadas no plano cartesiano, para a linguagem da máquina-ferramenta que será utilizada para a sua fabricação (SOUZA, 2004) (SOUZA e ULBRICH, 2009).

2.3.3. INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS CAD/CAM

Após a concepção de um modelo tridimensional em um sistema CAD, é necessário realizar a transferência desse modelo geométrico para um sistema CAM, em que será realizada a geração do programa NC para, posteriormente, ser transferida ao comando numérico da máquina-ferramenta CNC, em que será executada a manufatura desejada.

Quando o fabricante dos sistemas CAD e CAM são o mesmo, a transferência do modelo é realizada de forma direta, sem a necessidade de uma interface que faça a integração entre os sistemas.

Esse fato origina o recurso da associatividade, que permite uma integração entre os sistemas, em que qualquer alteração que haja no modelo geométrico dentro do sistema CAD, automaticamente o sistema CAM também se atualize

fazendo com que as áreas de projeto e manufatura trabalhem de forma simultânea.

Quando as empresas não possuem *softwares* de sistema CAD e CAM de mesmo fabricante, é necessária a utilização de uma interface de transferência.

Essa interface é responsável por converter o modelo geométrico tridimensional original em um formato neutro, ou seja, em um formato aberto a todos os sistemas CAD e CAM.

Essa conversão ocorre através dos cálculos internos da interface de transferência utilizando seus próprios recursos geométricos para a transformação do modelo geométrico original em um modelo geométrico de formato neutro.

Dentre as opções de interfaces de transferência do modelo geométrico, algumas opções frequentemente utilizadas tais como: IGES, STEP e VDAFS, entre outras, possuem diferentes recursos geométricos para a conversão de dados do modelo tridimensional em um formato neutro para que os diversos sistemas CAD e CAM possam ter acesso.

Alguns problemas com qualidade e precisão geométrica podem ocorrer durante a conversão do modelo geométrico gerado em um sistema CAD específico para modelo geométrico de formato neutro, pois quanto maior for a quantidade de recursos geométricos utilizados para a transferência, menores serão a possibilidade de ocorrerem problemas com a qualidade e a precisão do modelo convertido (SCHÜTZER e HELLENO, 2005).

Quando o modelo geométrico original abrange elementos que não fazem parte dos recursos geométricos disponíveis na interface de transferência escolhida, o mesmo será eliminado ou substituído por outro elemento geométrico (HENRIQUE, 2004).

Esses problemas de qualidade e precisão advindos do formato neutro podem acarretar em má geração da trajetória da ferramenta e possíveis colisões da

máquina-ferramenta. Por isso a escolha da interface de transferência é um fator importante para garantir a qualidade e precisão do modelo geométrico a ser transferido e evitar futuros problemas de geração da trajetória da ferramenta em um sistema CAM.

2.3.4. SISTEMA CNC

A introdução do CNC nas máquinas-ferramentas iniciou-se a partir da década de 70, possibilitando a utilização de uma linguagem de programação para o comando das máquinas-ferramentas.

Essa introdução resultou na integração entre a manufatura e as demais fases da cadeia do desenvolvimento do produto transformando o programa NC num elemento importante nessa integração.

Segundo Guo *et al.* (2006), o programa NC desempenha um papel vital na usinagem CNC, sendo o responsável por informar, por meio de uma linguagem própria de programação e de coordenadas do plano cartesiano, a trajetória da própria ferramenta e os parâmetros de corte para que a máquina possa executar a usinagem.

No início, sua aplicação nas indústrias encontrou grandes restrições decorrentes do grande número de fabricantes de CNC possuidores de suas próprias linguagens de programação, fazendo com que surgisse em 1978 a, norma ISO 6983, criando assim uma linguagem universal de programação NC.

Esta linguagem de programação foi de extrema importância para a aplicação do programa NC no ambiente industrial, sendo até hoje utilizada como padrão mundial de programação.

No entanto, esta linguagem não abrange todos os ciclos próprios dos CNC, tais como: ciclos automáticos personalizados, sub-rotinas, e funções especiais, fazendo com que a programação destes recursos exija programas NC específicos para cada modelo de CNC (ALBERTI et al, 2011) . A geração do

programa NC pode ser realizada por meio de dois métodos: programação manual e programação CAD/CAM conforme representa a Figura 11.

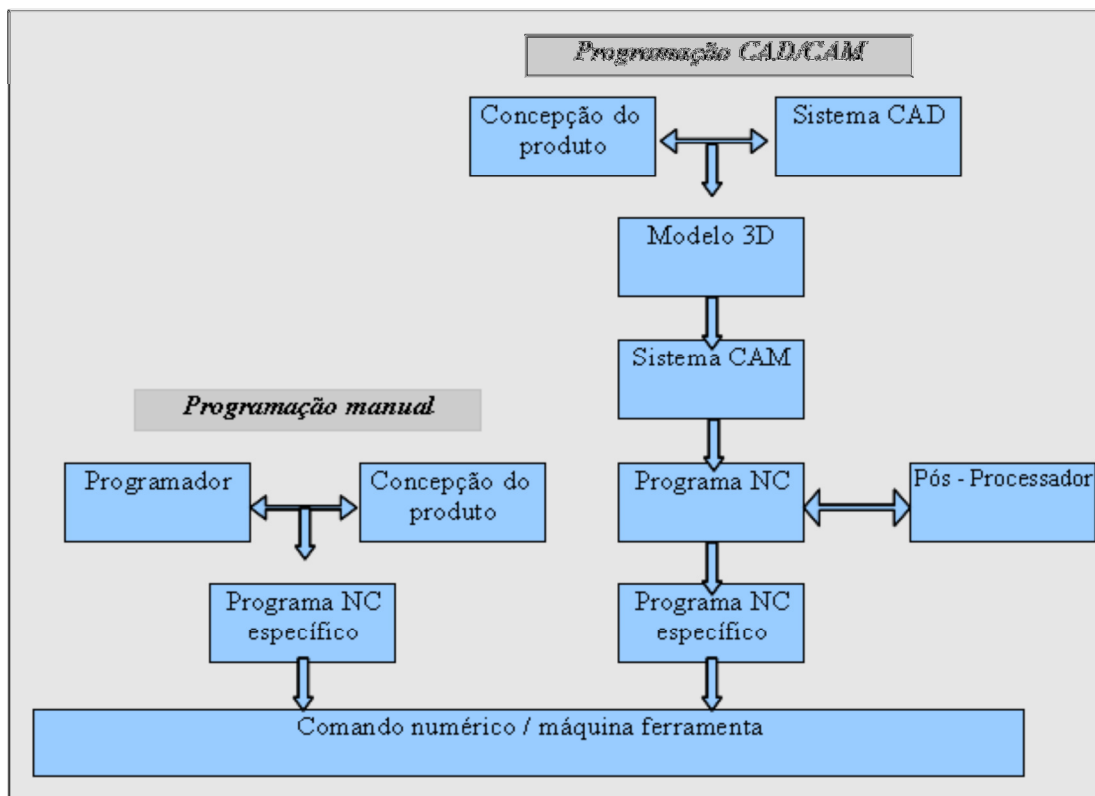


FIGURA 11: MÉTODOS DE GERAÇÃO DO PROGRAMA NC (ADAPTADO MCMAHON E BRONWE, 1999)

As principais vantagens da aplicação das máquinas CNC são: o aumento da flexibilidade de produção, a melhoria da qualidade, a redução dos tempos de ciclo e a capacidade de produzir lotes menores de maneira econômica (SIMON, 2009) (COSTA et al., 2004).

As principais desvantagens em relação às máquinas convencionais são: o alto custo de implantação, as paradas para manutenção são maiores e há necessidade de mão de obra especializada, conhecidos como programadores CNC (KOENIG, 1994).

Outra desvantagem na manufatura com máquina-ferramenta CNC é o gerenciamento da produção, se considerado a variável tempo de usinagem. Isto se deve ao fato de que o tempo de usinagem estimado por um sistema CAM está muito longe de ser confiável. O sistema CAM considera condições perfeitas de usinagem e não leva em consideração fatores importantíssimos que afetam diretamente o tempo real de usinagem.

Em toda máquina CNC pode-se verificar que os processos decisórios sobre parâmetros de corte e estratégias de usinagem são determinados pelos conhecimentos implícitos do programador CAM, sendo que, para isto, os sistemas CAM fornecem como indicadores de desempenho a simulação virtual de colisão do par ferramenta-peça e o tempo de usinagem teórico (YURDAKUL, 2009).

Neste sentido, a simulação virtual de colisão no sistema CAM tem sido amplamente desenvolvida de forma a ser atualmente uma ferramenta eficaz para o programador NC simular as colisões que poderão existir na execução do programa NC. Porém, o mesmo não pode ser afirmado em relação aos indicadores de tempo real de usinagem (WO, 2010).

É muito comum encontrar diversos questionamentos no que diz respeito ao motivo pelo qual os tempos obtidos através da programação da manufatura através de um software CAM são tão diferentes dos tempos obtidos durante o processo de usinagem. A resposta encontrada para estas questões é que os sistemas CAM são apenas ferramentas que permitem a programação de movimentos, sem visão das condições dinâmicas da máquina, tais como curvas de aceleração e desaceleração, comportamento das vibrações e quais estratégias são aplicáveis para minimizar estes efeitos (RODRIGUES, 2010).

Em uma máquina CNC seu desempenho é alterado também pela sua estrutura, que tem como objetivos principais fornecer rigidez, precisão, estabilidade térmica e facilidade de operação. Para máquinas de alta performance, essas características devem ser fornecidas dentro do contexto de rápidas taxas de

avanço, alta rotação e rápida aceleração. Essas características variam de acordo com a especificação de cada máquina (ARNONE, 1988).

Entre as principais características de desempenho de uma máquina CNC pode-se citar a sua precisão geométrica. Infelizmente, a precisão geométrica de uma máquina-ferramenta é muitas vezes esquecida pelos compradores, porque encarece muito o valor de venda da máquina, além de exigir uma mão de obra mais qualificada e possuir uma manutenção e componentes com um alto custo.

A precisão geométrica é avaliada por meio dos parâmetros de esquadro, retinilidade, paralelismo e ovalização, características dinâmicas das máquinas-ferramentas que se tornaram importante sujeito da pesquisa da indústria mecânica (WAIWAI, 2009).

Uma máquina de usinagem CNC consiste em parte mecânica, eletrônica e a unidade CNC. A parte mecânica consiste em estruturas, colunas, montagem do eixo árvore, mecanismos de velocidade de avanço. A motorização do eixo árvore e do sistema de avanço e seus servos amplificadores, unidade de potencia de alta voltagem e sensores de limites fazem parte da eletrônica da máquina. O sistema CNC consiste em unidade computadorizada, sensores de posição e velocidade para cada mecanismo de avanço (ALBERTI et al, 2011).

O operador transmite o programa NC gerado pelo CAM para o CNC, que processa as informações e geram os comandos de posições numéricas, velocidades de avanço e rotação. O CNC periodicamente executa controle digital que mantém a velocidade de avanço da ferramenta e seu percurso programado através de sensores de medição informando o tempo de usinagem. (ALTINTAS, 2000)

Arnone (1998) e Coelho et al. (2010) abordam esse problema relacionando o Tempo de Resposta de Máquina (TRM) e o tamanho do segmento da trajetória da ferramenta.

Monaro e Helleno (2010) desenvolveram um índice IDDyn baseado nas informações da máquina-ferramenta, do CNC e da estratégia de usinagem,

avaliando a trajetória da ferramenta antes da geração do programa NC. Esse novo sistema permitiu a otimização da trajetória da ferramenta e o cálculo do tempo real de usinagem, conforme ilustrado na Figura 12.

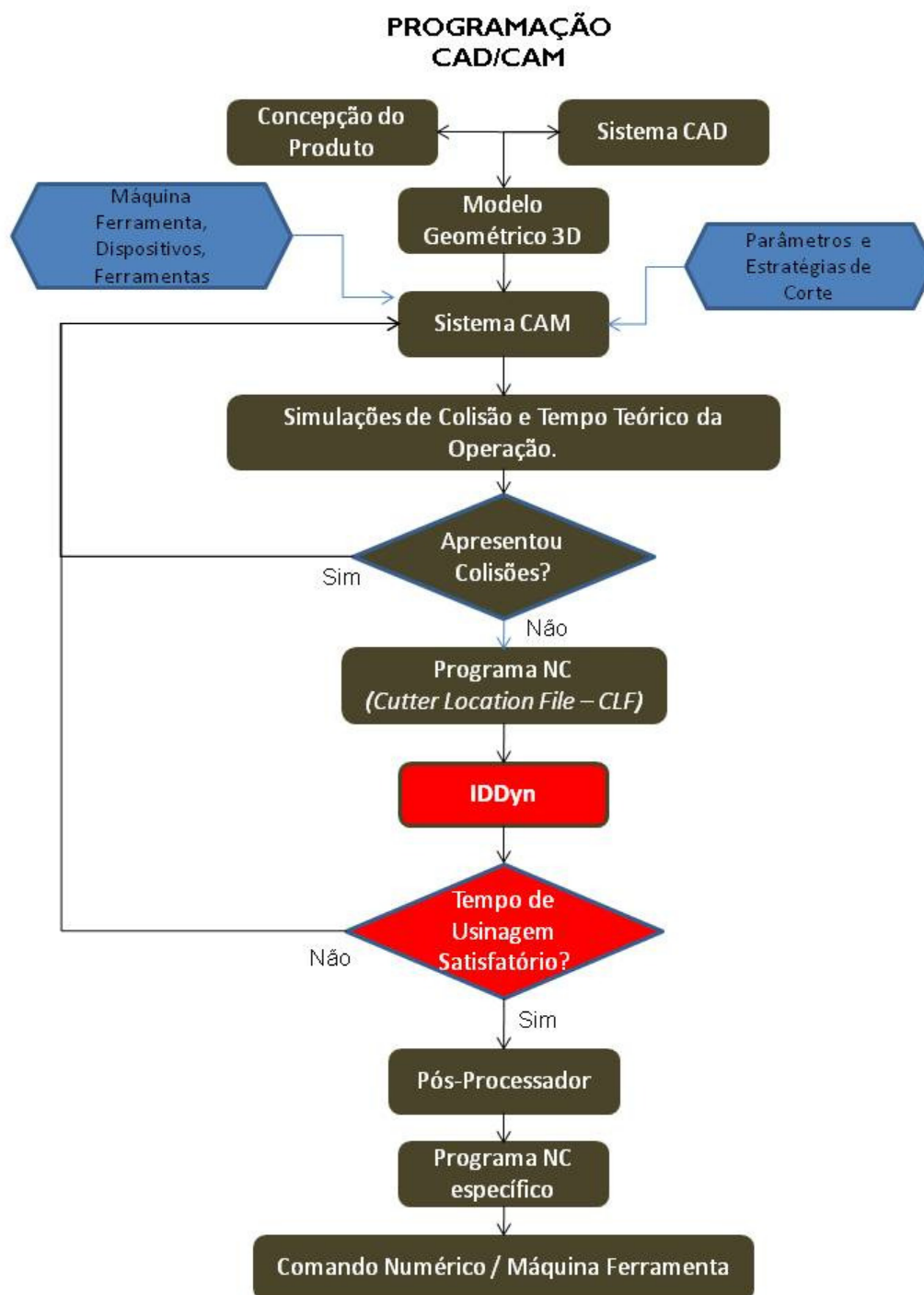


FIGURA 12: FLUXOGRAMA PROGRAMAÇÃO COM ÍNDICE (IDDYN) PARA APROXIMAÇÃO DO TEMPO REAL DE USINAGEM (MONARO E HELLENO, 2010)

O cálculo do tempo de usinagem é um problema enfrentado pelas empresas de manufatura que utilizam os sistemas CAM para gerar os programas NC's

A variação da velocidade de avanço em função das inversões de movimento conforme a geometria da trajetória da ferramenta não é levada em consideração na determinação do tempo de usinagem, fazendo com que haja uma considerável diferença entre o tempo de usinagem CAM e o tempo real de usinagem informado pelo CNC.

Outro fator que influencia o tempo de usinagem em qualquer manufatura de superfície complexa é a estratégia de corte, baseando-se nas interpolações da trajetória da ferramenta.

Dentre as metodologias existentes como recursos na cadeia CAD/CAM/CNC, o próximo tópico irá abordar dois tipos de interpolações: Interpolação Linear e Interpolação *Spline*, utilizados na análise experimental deste trabalho.

2.3.5. MÉTODO DE REPRESENTAÇÃO DA TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA

Após o produto ser reconhecido pelo sistema CAM, se torna necessário às escolhas das ferramentas, das operações, parâmetros de corte e das tolerâncias que serão utilizadas para a fabricação do produto.

A escolha da tolerância é um parâmetro muito importante durante a definição das estratégias de corte, pois o valor da faixa de tolerância adotada está diretamente relacionado com a exatidão com que a ferramenta irá percorrer sua trajetória, ou seja, quanto menor a faixa adotada, maior será a exatidão da trajetória da ferramenta e, assim, conseqüentemente, mais próximo será o modelo final do modelo gerado no sistema CAD (LASEMI et al., 2010) (CHOI e BANERJEE, 2007) (CHOI e JERARD, 1998).

A Figura 13 mostra um exemplo da faixa de tolerância e da trajetória da ferramenta criada.

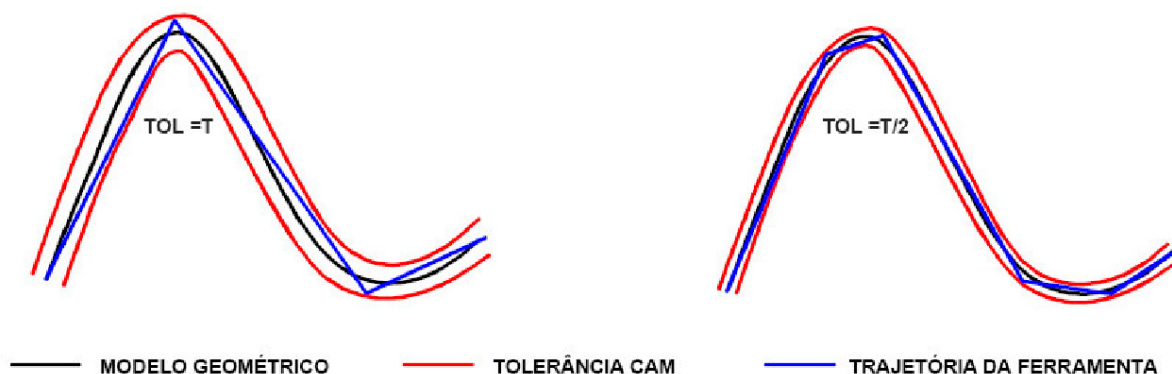


FIGURA 13: FAIXA DE TOLERÂNCIA E TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA (HELLENO, 2004).

Desta forma, pode-se dizer que, quanto maior a faixa de tolerância estabelecida, maior será a liberdade do sistema CAM em gerar a trajetória da ferramenta, ou seja, a trajetória da ferramenta será a mais simplificada possível, resultando em um tempo de cálculo menor, programa NC menor e segmentos de reta maiores e em menor quantidade (SOUZA, 2004).

Atualmente, com o desenvolvimento do sistema CAM, diferentes possibilidades de trajetórias de ferramentas, principalmente para as operações de acabamento, vêm sendo desenvolvidas. Isto permite flexibilidade ao usuário para definir a estratégia de corte mais adequada para determinada aplicação, buscando sempre a redução do tempo de usinagem e a melhor qualidade superficial do produto (GOLOGLU e SAKARYA, 2008).

Assim, para a geração do caminho da ferramenta, devem ser avaliados três Critérios principais: (LASEMI et al., 2010) (MARSHALL e GRIFFITHS, 1994):

- **Qualidade:** a geração do caminho da ferramenta deve estar livre de colisões e a altura de crista deve estar dentro da faixa de tolerância.
- **Eficiência:** eficiência na simulação baseada no tempo de processamento do sistema e o tempo real de usinagem alinhado na melhor estratégia de fabricação.

- **Robustez:** Um sistema robusto deve permitir a seleção de várias estratégias de corte com diferentes parâmetros.

Além da trajetória da ferramenta outro fator que deve ser analisado para a otimização da manufatura de moldes para injeção de plásticos é a escolha da máquina ferramenta.

Atualmente as máquinas ferramentas que possuem um melhor rendimento para as usinagens de moldes para injeção de plásticos são as que possuem a tecnologia HSC, que consiste em máquinas ferramentas com alto desempenho em seus módulos construtivos, que envolve desde um eixo árvore de alta rotação, acionamentos de alta performance dinâmica, comando numérico, projetos de construção leve, até sistemas de segurança.

A tecnologia HSC em ambiente fabril ainda pode ser considerada um processo de risco, não apenas pelo alto investimento necessário, mas também porque esta tecnologia demanda de outros fatores tecnológicos de extrema importância para seu sucesso. A figura 14 exemplifica esses fatores.



FIGURA 14: TECNOLOGIAS RELACIONADAS AO PROCESSO HSC (SCHULZ, 2003).

Dentre as principais tecnologias relacionadas ao processo HSC, destacam-se:

- Construção da máquina-ferramenta: o conceito estrutural e o material utilizado na construção da base da máquina devem ser precisamente analisados, visando uma redução de peso dos componentes móveis para que a máquina possa atingir altas velocidades de avanço e suportar às altas taxas de acelerações com segurança, mantendo a precisão;
- Ferramenta de corte: deve ser analisado o material, o revestimento e a geometria da ferramenta em cada situação específica, para que não haja redução da vida útil da ferramenta em consequência do aumento da velocidade de corte, tornando o processo inviável. Além disso, deve-se analisar o sistema de fixação da ferramenta e o balanceamento de todo o sistema;
- Comando numérico da máquina: este deve possuir alta capacidade de processamento para lidar com as altas velocidades de avanço e funções especiais que permitam a interpretação do programa NC;
- Programação NC: a programação deve ser realizada cautelosamente para evitar trajetórias de ferramenta com alterações bruscas e áreas que contenham diferentes volumes de material a ser removido, além disso o programador deva possuir experiência nesse processo de usinagem para utilizar as estratégias de corte corretas, extraindo o melhor rendimento da tecnologia HSC.

A inserção da tecnologia HSC no setor de moldes para injeção de plástico possibilitou a usinagem de materiais de dureza elevada, sendo um benefício relevante dentro da manufatura, pois permite a usinagem de moldes a partir de materiais de maiores durezas sem a necessidade de posterior tratamento térmico e suas implicações.

Esta tecnologia também contribuiu para a redução do tempo de usinagem, devido à possibilidade de se atingir melhor parâmetro de corte, e de tempo total de fabricação do molde, pois, após executar os passes de pré-acabamento e acabamento em uma máquina HSC a qualidade superficial obtida pode até dispensar o polimento manual para acabamento final. Além disso, o polimento manual causa um impacto negativo na precisão geométrica e dimensional, ou seja, na qualidade superficial do molde (Sandvick, 2002; Schmidt, 2000).

A tecnologia HSC, vem sendo desenvolvida principalmente para operações de fresamento atendendo dois segmentos principais: metais não ferrosos e acabamento de materiais ferrosos.

Para o desbaste e acabamento de materiais não ferrosos, visa à alta taxa de remoção de material e o semi-acabamento e acabamento com alta qualidade de acabamento superficial.

Para o acabamento de materiais ferrosos tem sua principal utilização nos fabricantes de matrizes e moldes, ocupando uma importante posição no processo produtivo, pela considerável redução do *lead time*, tendo como maiores demandantes a indústria automotiva, de eletrodomésticos e de bens de consumo.

Além da tecnologia HSC, para se conseguir o processo de fabricação ideal é necessário o desenvolvimento dos programas NC e dos sistemas de transmissão de dados (Youjiang et al, 2010).

Os programas NC são diretamente influenciados pela escolha dos diferentes tipos de interpolação da ferramenta, interferindo no tempo e exatidão geométrica da peça resultante pela usinagem.

Dentre os diversos tipos de interpolação existentes nos programas NC, o próximo tópico irá abordar a interpolação Linear e interpolação *Spline*, utilizados nos experimentos desse trabalho.

2.3.5.1. INTERPOLAÇÃO LINEAR

Atualmente, devido à simplicidade matemática em relação a outros métodos de interpolações e facilidade de uso pelo programador, a trajetória da ferramenta representada pela Interpolação Linear tornou-se um padrão no ambiente industrial (LARTIGUE et al., 2001), em que a maioria dos sistemas CAM utilizam seus conceitos, uma vez que não são necessárias características especiais do CNC e do sistema CAM para sua execução.

Para Souza (2004), a Interpolação Linear é determinada por uma representação matemática simples (comparada aos demais métodos), cuja trajetória da ferramenta é dada através de segmentos de retas. A Figura 15 representa o método de interpolação Linear.

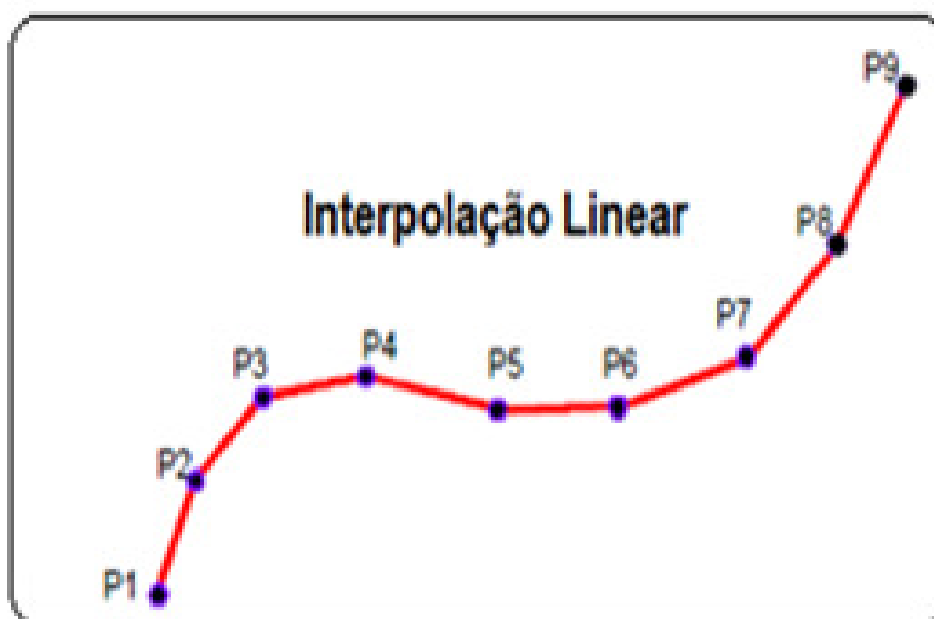


FIGURA 15: REPRESENTAÇÃO DA INTERPOLAÇÃO LINEAR.

De acordo com a linguagem de programação ISO 6983, estes segmentos de retas são representados pelo comando G01 (Interpolação Linear), conforme representado na Figura 16.

```

N450 Z10.
N460 ;Approach Move
N470 Z3.6
N480 ;Engage Move
N490 G1 Z1.739 M8 F995.
N500 X33.503 Z1.466
N510 X33.528 Z1.194
N520 X33.571 Z.924
N530 X33.633 Z.658
N540 X33.713 Z.397

```

FIGURA 16: LINHAS DE UM PROGRAMA NC EM FORMATO *LINEAR*

Sendo esta característica extremamente importante para a introdução da programação CAM no ambiente industrial, uma vez que não necessita de características especiais do CNC e do sistema CAM.

A Interpolação Linear, devido a sua estrutura baseada em segmentos de reta, resulta em um modelo matemático simples, se comparada aos outros métodos de interpolação.

Além disso, esse método é o que melhor se adapta à faixa de tolerância definida pelo programador CAM, em usinagens de superfícies convencionais, conforme ilustra a Figura 17.

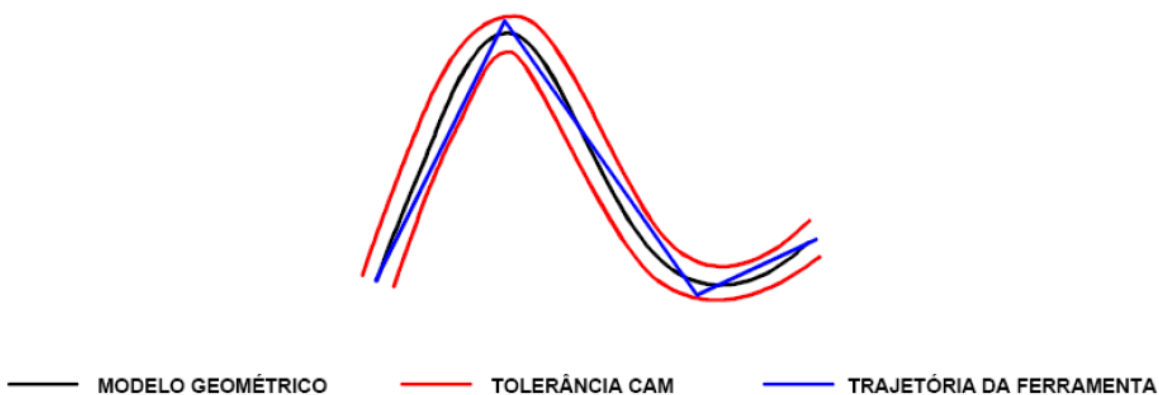


FIGURA 17: TOLERÂNCIA CAM NA REPRESENTAÇÃO DA INTERPOLAÇÃO LINEAR (HELLENO, 2004)

É justamente pelo uso de segmentos de reta que um dos maiores problemas encontrados com a utilização da Interpolação Linear está na representação de superfícies complexas. Neste caso, para atingir a faixa de tolerância desejada, a trajetória da ferramenta será representada por pequenos segmentos de reta, que resultarão em reduções da velocidade de usinagem (SCHÜTZER e HELLENO, 2003).

Segundo Lartigue *et al.* (2004) o processo convencional de usinagem usando Interpolação Linear não se adapta bem para altas velocidades e usinagem de alta precisão. Isso ocorre, devido às discontinuidades que aparecem na junção dos segmentos lineares e a grande quantidade de dados a serem transmitidos.

Dentre as características deste método pode-se ressaltar (ARNOME, 1998) (OLLING, 1999):

- Método mais aplicado na indústria devido ao uso de formas matemáticas bastante simples;
- Programas NC extensos;
- Baixa qualidade de acabamento devido ao facetamento da superfície usinada, principalmente para grandes tolerâncias no Sistema CAM, quanto menor for à tolerância no Sistema CAM, maior será o número de segmentos de reta gerados para a trajetória da ferramenta, em função disso, os programas NC serão mais extensos.

O facetamento da superfície gerada na trajetória da ferramenta, associado às altas taxas de velocidade de avanço, resultam em significativos problemas no tempo de processamento do CNC, características da variação da aceleração e desaceleração constantes na usinagem (MOREIRA, 2003) (LARTIGUE *et al.*, 2004) (LANGERSON *et al.*, 2004).

As variações de aceleração e desaceleração da usinagem refletirão em oscilações na máquina ferramenta, resultando em uma sobrecarga extrema nos eixos, pior acabamento superficial dificultando as etapas de acabamento

manual (polimento), pior exatidão geométrica e um aumento do tempo de usinagem (STROH e ABELE, 2005) (HEO et al., 2006).

2.3.5.2. INTERPOLAÇÃO *SPLINE*

Devido às limitações existentes no método de Interpolação Linear descrito no tópico anterior, um novo método de representação da trajetória da ferramenta tem sido a solução para as empresas de usinagem, que fabricam produtos com superfícies complexas, denominada Interpolação *Spline*.

A Interpolação *Spline*, utiliza um modelo de segmentos de curvas em sua representação, modelos de curvas denominados NURBS. Esse modelo de curva permite determinar a intensidade que cada ponto do polígono de controle atue na formação da curva.

Os segmentos de curva NURBS permitem, através de vários métodos de expressões de superfícies complexas, uma ferramenta poderosa e maior liberdade na geração e modificação das superfícies (JEE e KOO, 2003).

Essas superfícies têm a vantagem de permitir a sua manipulação de forma localizada em torno de uma região, através do ajuste dos pontos de controle (JEE e KOO, 2003). A figura 18 mostra as modificações de intensidade dos pontos do polígono de controle.

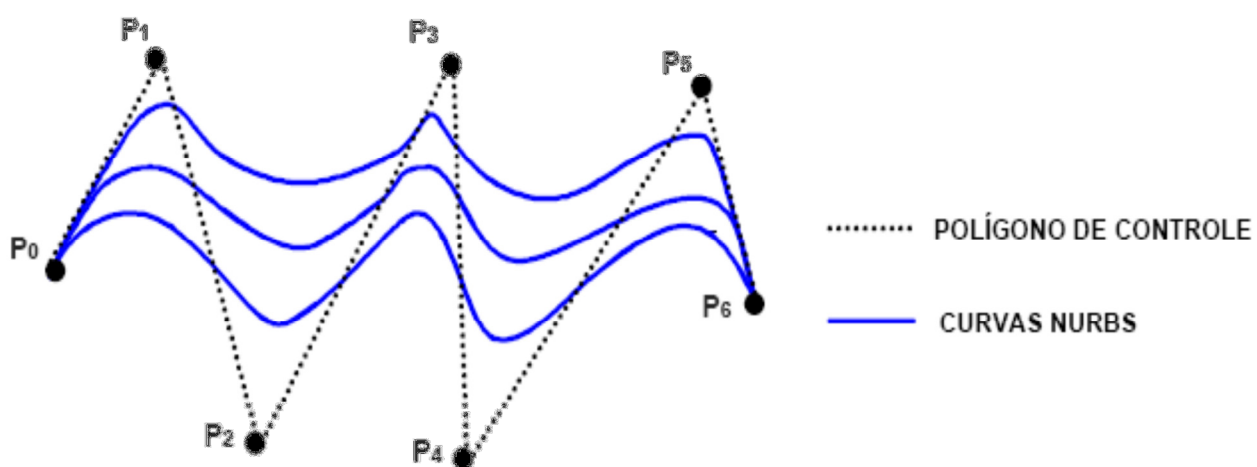


FIGURA 18: EXEMPLOS DE CURVAS NURBS (ADAPTADO MCMAHON E BRONWE, 1999)

A característica do modelo de curva NURBS, permite ao software CAM, obter a melhor forma da curva para a representação da trajetória da ferramenta. A qual permite gerar uma trajetória da ferramenta mais suave e com menor quantidade de curvas.

O segmento de curva NURBS, utilizado como método de geração da trajetória da ferramenta, melhora a qualidade superficial e, ao mesmo tempo, minimiza o tempo de usinagem em superfícies complexas (JEE; KOO, 2003).

A Interpolação *Spline* utiliza um método de representação da trajetória da ferramenta baseado em modelos matemáticos bastante complexos, por isso apenas os softwares de grande porte possuem estrutura para se adaptar a esse tipo de interpolação.

Para a utilização desse tipo de interpolação é necessário o desenvolvimento de um pós-processador capaz de interpretar fielmente a interpolação NURBS utilizada nos sistemas CAM e transformá-las num programa NC, respeitando os recursos do CNC.

Dentre as características da aplicação do método de Interpolação *Spline* na geração do programa NC, pode-se ressaltar (ZELINSKI, 2003) (MOREIRA, 2003):

- Segmentos de reta são substituídos por curvas, eliminando os problemas decorrentes do tempo de processamento de bloco e picos de aceleração e desaceleração;
- Melhor acabamento superficial;
- Programas NC extremamente menores em relação aos da Interpolação Linear em decorrência da necessidade de um número menor de pontos para representar a mesma superfície;

- Redução do tempo de usinagem, principalmente para superfícies complexas, uma vez que a velocidade avanço real se aproxima do avanço programado.

Esse método também, devido à utilização de curvas que melhor se adaptam à geometria da peça, consegue respeitar com mais precisão a tolerância informada no Sistema CAM, permitindo, assim, uma trajetória da ferramenta mais suave (SCHÜTZER; HELLENO, 2003).

A figura 19 representa a precisão da trajetória da ferramenta em relação à tolerância do modelo geométrico:

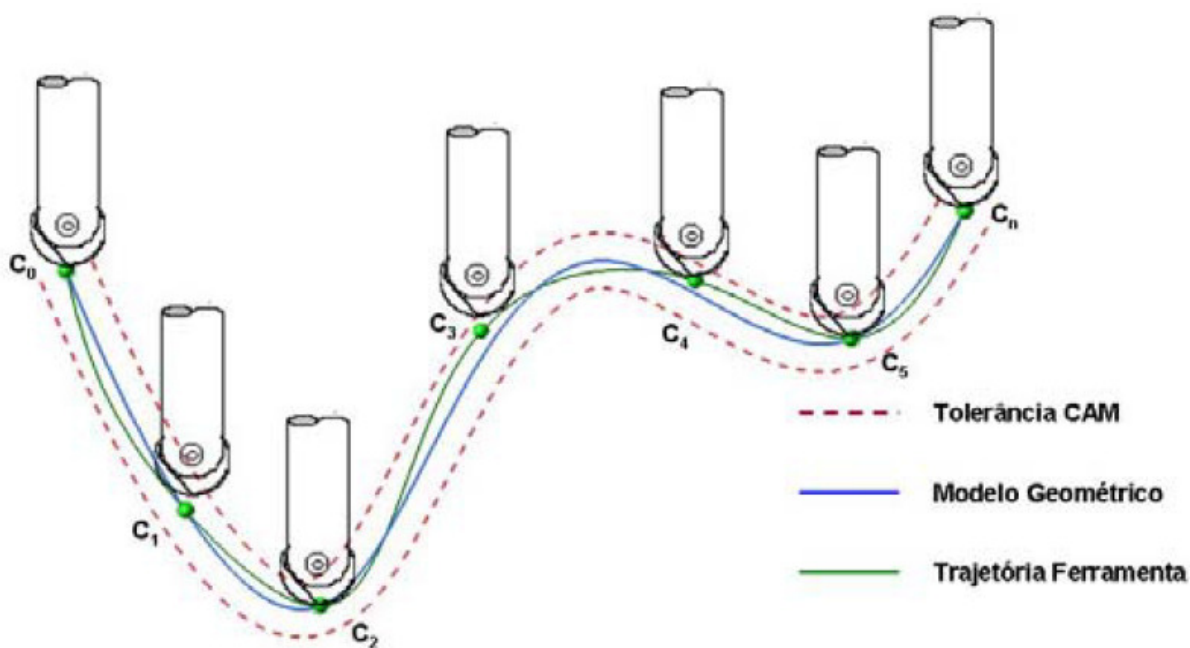


FIGURA 19: REPRESENTAÇÃO DE INTERPOLAÇÃO *SPLINE* (HELLENO, 2004)

O programa NC gerado método *Spline* não contém os comandos tradicionais, G01, G02 ou G03 (utilizados frequentemente na Interpolação Linear), mas possuem uma nova codificação, como ilustra a Figura 12.


```
...  
N4 G43 Z27.822 H00  
N5 Z11.1  
N6 G01 Z-2.075 M08 F4000.  
N7 POLY PO[X]=(-2.446 ,-.012 ,.006) PO[Y]=(0.,0,0) PO[Z]=(-1.851 ,-.031 ,.012)  
N8 PO[X]=(-2.393 ,.005 ,-.001) PO[Y]=(0.,0,0) PO[Z]=(-1.643 ,.004 ,-.001)  
N9 PO[X]=(4.469 ,4.219 ,-.538) PO[Y]=(0,0,0) PO[Z]=(8.291 , -1.168 ,-.792)
```

FIGURA 20 LINHAS DE UM PROGRAMA NC EM FORMATO *SPLINE*

3. MÉTODO DE PESQUISA

Uma ampla revisão bibliográfica foi realizada ao longo de todo o trabalho, abordando temas como a manufatura de moldes para injeção de plásticos, os sistemas CAD/CAM/CNC e os principais métodos de representação da trajetória da ferramenta. Essa pesquisa foi realizada por meio de livros sobre estes temas, artigos de revistas especializadas (nacionais e internacionais), artigos de congressos e seminários e artigos científicos disponíveis no portal de periódicos da CAPES.

Em paralelo à revisão bibliográfica, o desenvolvimento deste projeto envolve, ainda, as etapas de ensaios preliminares, que buscam atingir os objetivos propostos.

De acordo com objetivo geral deste trabalho, que é analisar a inserção da Interpolação *Spline* na manufatura de moldes para injeção de plástico, verificando seus benefícios em relação à Interpolação Linear, propõem-se:

- Fazer um levantamento bibliográfico sobre as Interpolações Linear e *Spline* e assuntos relacionados;
- Comparar o efeito do tempo de usinagem entre as Interpolações Linear e *Spline*;
- Comparar a exatidão geométrica entre as Interpolações Linear e *Spline*.
- Comparar o aspecto superficial entre as Interpolações Linear e *Spline*.

O método de pesquisa utilizado no trabalho foi à pesquisa experimental, o qual foi desenvolvido um corpo de prova, representando formas de superfícies habitualmente encontradas em moldes para injeção de plásticos.

A usinagem dos modelos foi repetida seis vezes, três vezes utilizando o acabamento com a Interpolação Linear e três vezes utilizando o acabamento com Interpolação *Spline* para efeito de comparação e validação dos resultados, totalizando seis corpos de prova.

A análise dos resultados será verificada por meio da operação de acabamento, mantendo, assim, as operações de desbaste e semi-acabamento dos corpos de prova iguais.

A operação de acabamento é considerada crítica na manufatura de moldes para injeção de plásticos, devido ao alto tempo de usinagem e a necessidade de atingir um bom acabamento na superfície usinada.

Para manter as mesmas condições de teste, os parâmetros de corte foram mantidos iguais. Estes valores foram determinados para obter um processo de usinagem dentro das características e especificações dos fabricantes de ferramentas de corte.

A análise dos resultados obtidos por meio da pesquisa experimental foi realizada utilizando os seguintes itens de controle:

- Tempo de usinagem, obtido durante a usinagem do corpo de prova;
- Exatidão geométrica, obtida por meio de erros geométricos existente na peça usinada comparada com o modelo CAD, através da medição realizada em uma máquina de medição por coordenadas.
- Aspecto superficial, obtido através da comparação visual das superfícies usinadas.

Os resultados obtidos nos experimentos estão no capítulo 4 que apresenta o desenvolvimento do trabalho.

4. DETALHAMENTO DO MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo descreve os experimentos que foram desenvolvidos, almeja-se com estes experimentos a análise comparativa das interpolações Linear e *Spline*, de acordo com o abordado no capítulo 3.

Inicialmente o corpo de prova, representando formas de superfícies habitualmente encontradas em moldes para injeção de plásticos foi projetado no sistema CAD.

Posteriormente, no sistema CAM, foi feita toda a programação das operações de desbaste, pré-acabamento e acabamento Linear e *Spline*, foi também realizado a simulação de usinagem e registrado os tempos teóricos de todas as operações. Nesta etapa também foi desenvolvido os programas NC.

A próxima etapa foi à transmissão do programa NC para a máquina-ferramenta, e a realização da usinagem dos corpos de prova. Nesta etapa foi registrado o tempo real da usinagem de todas as operações.

Na etapa seguinte, os corpos de prova foram inspecionados por meio de uma máquina tridimensional. Os resultados dessa inspeção foram comparados com os modelos 3D dos corpos de prova.

Na ultima etapa da pesquisa experimental, os dados obtidos foram compilados e analisados, resultando nas conclusões desse trabalho.

As etapas de manufatura e inspeção dos corpos de prova representam os processos executados na manufatura de moldes para a injeção de plástico na maioria das empresas desse segmento.

A figura 21 representa as etapas da manufatura e inspeção dos corpos de prova realizada na pesquisa experimental.

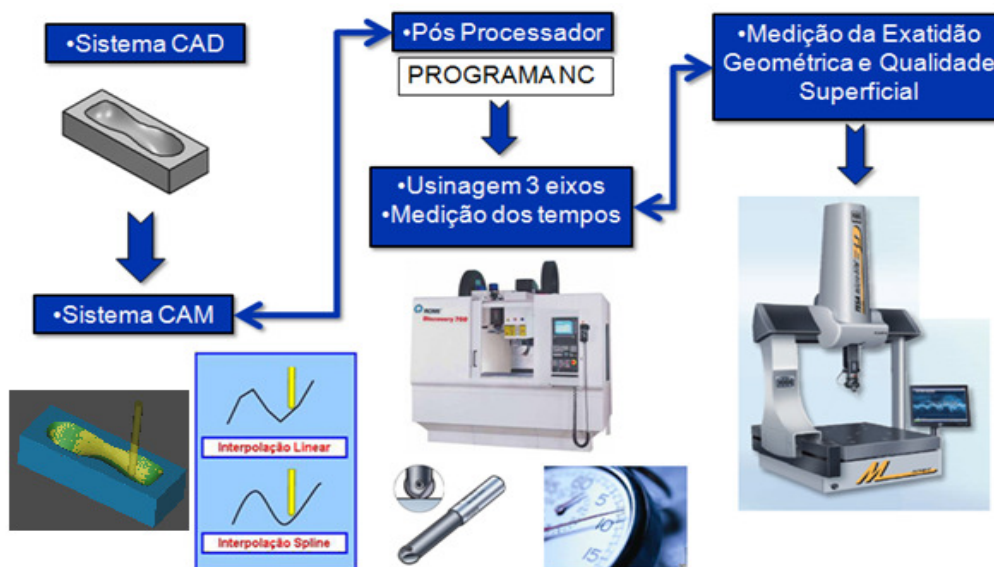


FIGURA 21: METODOLOGIA PARA MANUFATURA E INSPEÇÃO DO CORPO DE PROVA

4.1. CORPO DE PROVA

Os corpos de prova utilizados no experimento possuem as seguintes dimensões: 150 x 100 x 30 mm, conforme figura 22.

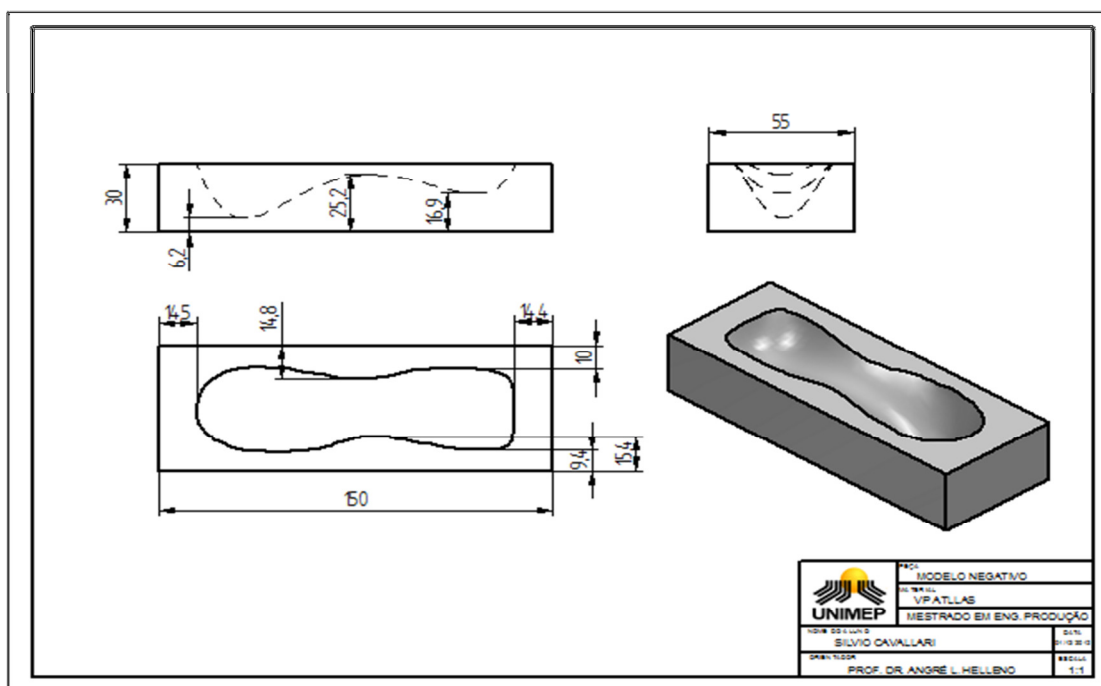


FIGURA 22: CORPO DE PROVA

O material utilizado nos corpos de prova foi o aço VP Atlas. Esse material foi fornecido pela empresa Villares Metals, é amplamente utilizado na manufatura de moldes para injeção de plástico, material nacional, que acompanha a tendência de baixo custo e alta dureza exigida pelo mercado de moldes.

As características técnicas do material VP Atlas estão descrita na tabela 2.

TABELA 2: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO MATERIAL VP ATLAS (VILLARES, 2012).

Composição Química:	Aço ligado ao Cr-Mo-Mn + microadições
Características:	Aço elaborado sob desgaseificação a vácuo, com boa usinabilidade devido a sua composição química balanceada e ao tratamento de inclusões com Cálcio. Possui maior resistência mecânica quando comparado ao AISI P20.
	Seus principais benefícios são: <ul style="list-style-type: none"> • Boa usinabilidade no estado beneficiado; • Boa soldabilidade; • Excelente polibilidade e resposta a texturização; • Excelente nitretabilidade; • Alta uniformidade de dureza em toda a secção transversal da peça. • Alta reprodutibilidade de desempenho.
Estado de fornecimento:	Fornecido beneficiado com dureza entre 350 - 390 HB (38 - 42 HRC).
Aplicações:	<ul style="list-style-type: none"> • Moldes para injeção de plásticos não clorados, em especial para aplicações que necessitem de maior resistência mecânica e ao desgaste que os aços AISI P20 ou DIN 1.2738; • Matrizes para extrusão de termoplásticos não clorados; • Aplicações diversas em moldes para plástico.
Usinagem:	O aço VP ATLAS apresenta bom desempenho nas principais operações de usinagem, como torneamento, fresamento, furação e retífica.

4.2. MÁQUINA UTILIZADA NOS ENSAIOS

O estudo foi desenvolvido em um centro de usinagem vertical, modelo Discovery 760 (figura 23), fabricado pelas Indústrias ROMI S.A, apresentando as seguintes especificações técnicas:

- Rotação máxima: 10.000 RPM;
- Avanço rápido: 25.000 mm/min;
- Máximo avanço programável: 5.000 mm/min;
- Comando Siemens 810D configurado especialmente, devido solicitação do SCPM, permitindo além de sua configuração *standard*, características adicionais como: execução de funções *Splines* e interface para *ethernet*.



FIGURA 23: CENTRO DE USINAGEM VERTICAL, MODELO DISCOVERY 760, FABRICADO PELAS INDÚSTRIAS ROMI S.A

4.3. SISTEMA CAD/CAM

O desenvolvimento da geometria e da programação NC foi realizado no *software* NX8 da empresa Siemens PLM *Software*, que possui os módulos

CAD e CAM integrados facilitando as eventuais mudanças de geometria e programação.

O módulo CAM possui ferramentas para a geração de estratégias com multi-eixos e permite a verificação e simulação da trajetória da ferramenta com todos os elementos do processo de usinagem, tais como: máquina-ferramenta, ferramenta, dispositivo de fixação da peça e peça.

4.4. MEDIÇÃO GEOMÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA

Para a medição geométrica dos corpos de prova utilizou-se uma máquina de medir por coordenadas da marca Hexagon modelo TESA MICRO-HITE DCC (Figura 24), com eixos de 705, 605 e 505 milímetros de comprimento, resolução de 0.1 μm em cada eixo e erros máximos permissíveis iguais a $MPEP = 1.9 \mu\text{m}$ e $MPEE = 1.9 + 3L/1000 \mu\text{m}$, para L dado em metros quando a máquina é equipada com apalpador TP200 (ISO, 2001). As medições foram feitas em ambiente com $20 \pm 1^\circ \text{C}$ obedecendo as recomendações do fabricante.



FIGURA 24: MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADA

Foram tomados alguns cuidados com relação à limpeza, ao tempo de estabilização e à fixação da peça. Demais cuidados secundários também seguiram as boas práticas de medição.

Características e componentes da Máquina de medir por coordenadas:

- Volume de trabalho de 440 x 490 x 390 mm;
- Velocidade máxima de translado de 350 mm/segundo;
- Cabeçote indexável manual, modelo TESASTAR-i com dois eixos de rotação;
- Sistema CAI utilizado foi o PC-DMIS versão 4.2

A comparação da exatidão geométrica entre os corpos de prova e o modelo geométrico desenvolvido no sistema CAD foi realizada conforme procedimento ilustrado na Figura 25.



FIGURA 25: PROCEDIMENTO PARA MEDIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

O modelo geométrico, inicialmente desenvolvido no Sistema CAD, é transferido para o software da máquina de medição por coordenada, através de formatos neutros de conversão geométrica, tais como: IGES e STEP.

Baseado nesse modelo geométrico, o *software* de medição localizará o corpo de prova e a partir de um plano de referência faz a medição dos corpos de prova e registra as coordenadas obtidas em cada medição.

Nesse procedimento, a referência utilizada na máquina de coordenadas é extremamente importante, uma vez que, os erros provenientes dessa referência serão automaticamente transferidos para a comparação geométrica.

Em função disso foi usinada nos corpos de provas uma face de referência para cada eixo do sistema de coordenadas (X, Y, Z). A forma de medição do corpo de prova foi ordenada pela varredura por pontos, ao longo de toda a superfície. Esta varredura foi dividida em 245 pontos distribuídos uniformemente pela superfície usinada, possibilitando assim avaliar a exatidão geométrica do corpo de prova.

A Figura 26 ilustra o plano de medição adotado e as referencias utilizadas.

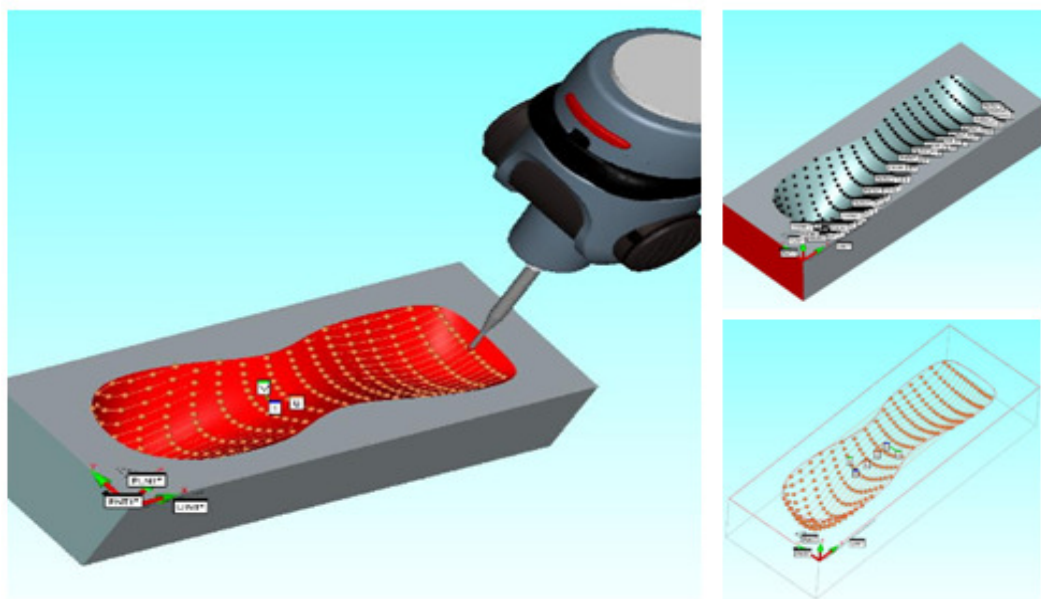


FIGURA 26: PLANO DE MEDIÇÃO BASEADO NA VARREDURA POR PONTOS

Foram realizadas três sequencias aleatórias de medições dos seis corpos de prova, cada corpo de prova com 245 pontos, e, portanto, foi medido um total de 735 pontos por corpo de prova.

Com os resultados obtidos foi possível comparar a exatidão da geometria do corpo de prova com o modelo geométrico do sistema CAD, permitindo assim, verificar o seu comportamento para cada uma das metodologias de interpolação em estudo.

4.5. DESCRIÇÃO DAS OPERAÇÕES DE USINAGEM

Os corpos de prova foram usinados seguindo as tradicionais sequencias de manufatura de moldes e matrizes (TOH, 2004) e (LASEMI et al., 2010):

- Desbaste,
- Pré-acabamento;
- Acabamento.

As metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta a serem analisadas durante a operação de acabamento foram distribuídas ao longo dos corpos de prova, conforme Tabela 3.

TABELA 3: DISTRIBUIÇÃO DAS QUANTIDADES, TIPOS DE INTERPOLAÇÃO E TOLERÂNCIA CAM DOS CORPOS DE PROVA.

Quantidade	Tipo de Interpolação	Tolerância CAM
3	Linear	0,0025
3	<i>Spline</i>	0,0025

4.5.1. OPERAÇÃO DE DESBASTE

A operação de desbaste foi realizada através da estratégia de usinagem Zig-Zag, com uma ferramenta esférica contendo duas arestas de corte indexáveis, utilizando os parâmetros de corte descritos na Tabela 4.

TABELA 4: PARÂMETROS DE CORTE DA OPERAÇÃO DE DESBASTE DOS CORPOS DE PROVA

Desbaste dos corpos de prova	
Rotação do eixo arvore	5305 rpm
Velocidade de avanço da mesa (vf)	1379 mm/min
Velocidade de corte (Vc)	200 m/mim
Avanço por aresta (fz)	0,13 mm
Profundidade de corte (ap)	0,7 mm
Espessura do corte (ae)	3,6 mm
Sobremetal	0,5 mm
Diâmetro da fresa	12 mm
Aresta de corte	2

A figura 27 representa o modelo virtual do corpo de prova após a operação de desbaste.

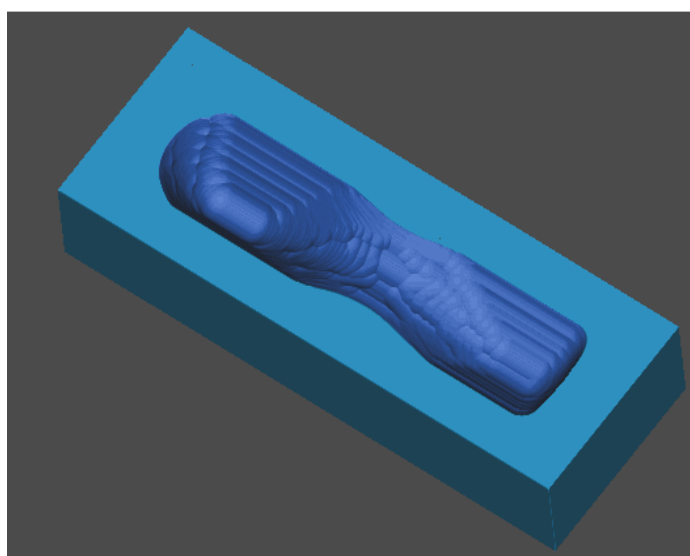


FIGURA 27: DESBASTE DOS CORPOS DE PROVA

4.5.2. OPERAÇÃO DE PRÉ - ACABAMENTO

Esta operação tem como finalidade eliminar o excesso de material deixado pelo desbaste, procurando dessa forma, manter um sobremetal constante de 0,2 mm.

A operação de pré-acabamento foi realizada através da estratégia de usinagem Zig-Zag, com uma ferramenta esférica de metal duro interiça contendo duas arestas de corte, utilizando os parâmetros de corte descritos nas Tabelas 5.

TABELA 5: PARÂMETROS DE CORTE DA OPERAÇÃO DE PRÉ-ACABAMENTO

Pré - acabamento dos corpos de prova	
Rotação do eixo arvore	4775 rpm
Velocidade de avanço da mesa (vf)	955 mm/min
Velocidade de corte (Vc)	120 m/mim
Avanço por aresta (fz)	0,1 mm
Profundidade de corte (ap)	0,5 mm
Espessura do corte (ae)	0,7 mm
Sobremetal	0,2 mm
Diâmetro da fresa	8 mm
Aresta de corte	2

A figura 28 representa o modelo virtual do corpo de prova negativo após a operação de pré-acabamento.

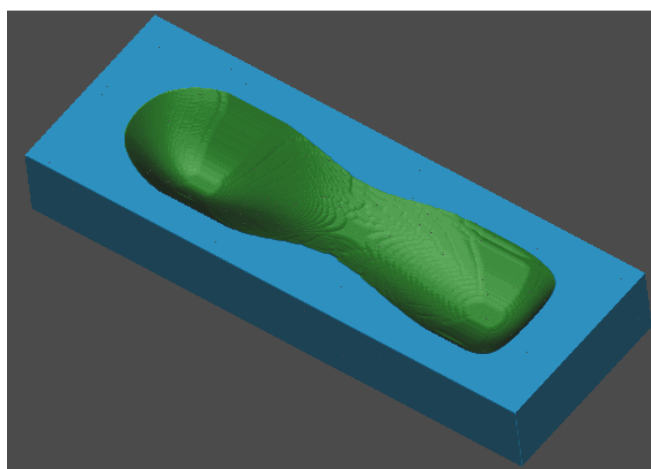


FIGURA 28: PRÉ-ACABAMENTO DOS CORPOS DE PROVA

4.5.3. OPERAÇÃO DE ACABAMENTO

A operação de acabamento tem por finalidade deixar a superfície usinada conforme o modelo geométrico CAD. Esta operação foi utilizada para comparar as metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta (Linear e *Spline*) em que foram realizados todos os ensaios desse trabalho.

Esta operação foi realizada por meio da estratégia de usinagem Zig-Zag, com uma ferramenta esférica de metal duro interiça contendo duas arestas de corte, utilizando os parâmetros de corte descritos nas Tabelas 6.

TABELA 6: PARÂMETROS DE CORTE DA OPERAÇÃO DE ACABAMENTO

Acabamento dos corpos de prova	
Rotação do eixo arvore	5968 rpm
Velocidade de avanço da mesa (vf)	596 mm/min
Velocidade de corte (Vc)	150 m/mim
Avanço por aresta (fz)	0,1 mm
Espessura do corte (ae)	0,2 mm
Diâmetro da fresa	8 mm
Aresta de corte	2

A figura 29 representa o corpo de prova após a finalização da usinagem.



FIGURA 29: CORPO DE PROVA APÓS A FINALIZAÇÃO DA USINAGEM

A manufatura da operação de acabamento do corpo de prova foi realizada de forma aleatória (sorteio) totalizando seis peças, três com interpolação Linear e três com interpolação *Spline*. A tabela 7 representa a sequência das peças usinadas.

TABELA 7: SEQUÊNCIA DAS PEÇAS USINADAS

Sequência	Tipo de Interpolação
1°	<i>Spline</i>
2°	<i>Spline</i>
3°	Linear
4°	<i>Spline</i>
5°	Linear
6°	Linear

Todas as peças foram identificadas para facilitar rastreabilidade na verificação metrológica. A figura 30 indica a gravação feita nas peças.

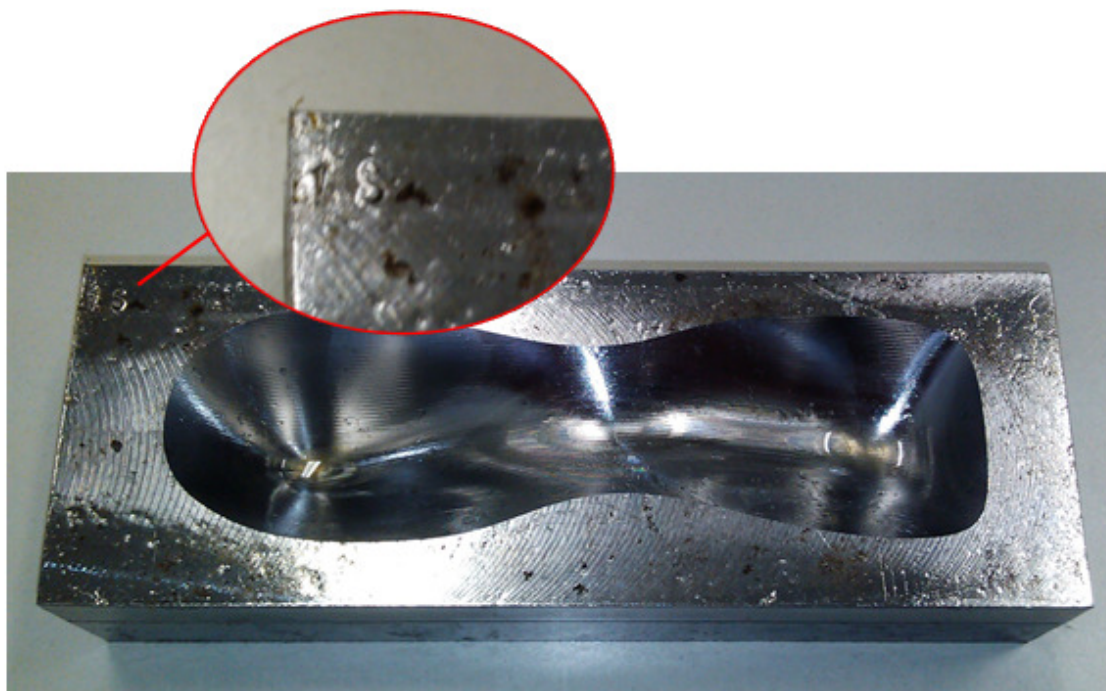


FIGURA 30: GRAVAÇÃO PARA RASTREABILIDADE

4.6. FERRAMENTAL UTILIZADO NOS ENSAIOS

Os ensaios de usinagem foram realizados com ferramental da empresa Sandvik do Brasil S.A., em cada operação de usinagem foi utilizada as seguintes ferramentas:

- **Operação de Desbaste:** Fresa esférica Ø 12 mm com duas arestas de cortes para insertos intercambiáveis (R216-12A20-045) e insertos classe 1025 (R216-12 02M-M);
- **Operação de Pré-acabamento:** Fresa esférica Ø 8 mm interiça de metal duro com duas arestas de corte (B222 F8);
- **Operação de Acabamento:** Fresa esférica Ø 8 mm interiça de metal duro com duas arestas de corte (B222 F8).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na pesquisa experimental, pela da comparação das metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta Linear e *Spline*.

5.1. TEMPO DE USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA

O tempo de usinagem obtido na manufatura dos corpos de prova foi registrado através de um cronometro, conforme apresenta a tabela 8

TABELA 8: TEMPO DE USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA

TEMPO DE USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA			
OPERAÇÃO	TEMPO CAM (mm/min.)	TEMPO REAL (mm/min.)	VARIAÇÃO
DESBASTE	21	37	76%
PRÉ - ACABAMENTO	29	52	79%
ACABAMENTO LINEAR	48	73	52%
ACABAMENTO SPLINE	48	59	23%

Para efeito comparativo entre os tempos de usinagem planejados e os reais, os tempos apresentados pelo software (tempo CAM) foram considerados como tempo de referência (100%).

Nos dados obtidos da usinagem, a Interpolação *Spline* apresentou um tempo de fabricação menor em relação ao tempo da Interpolação Linear, atingindo uma redução de 29% do tempo de usinagem (acabamento).

Esses resultados fundamentam o referencial bibliográfico, afirmando que a usinagem com a Interpolação *Spline* apresenta um tempo de fabricação menor do que a usinagem, do mesmo corpo de prova, utilizando a Interpolação Linear.

Essas variações dos tempos de usinagem ocorrem devido à diferença trajetória da ferramenta em ambas as interpolações. A Interpolação *Spline* utiliza seguimentos de curva na trajetória da ferramenta minimizando os impactos da aceleração e desaceleração da máquina, conseguindo ser executada com um

avanço próximo ao avanço programado pelo CAM. Já na Interpolação Linear, a trajetória da ferramenta é representada por segmentos lineares, onde o efeito da aceleração e desaceleração da máquina cresce, resultando em avanços na usinagem menores que os programados pelo CAM.

A figura 31 analisa graficamente os tempos de usinagem dos corpos de prova.

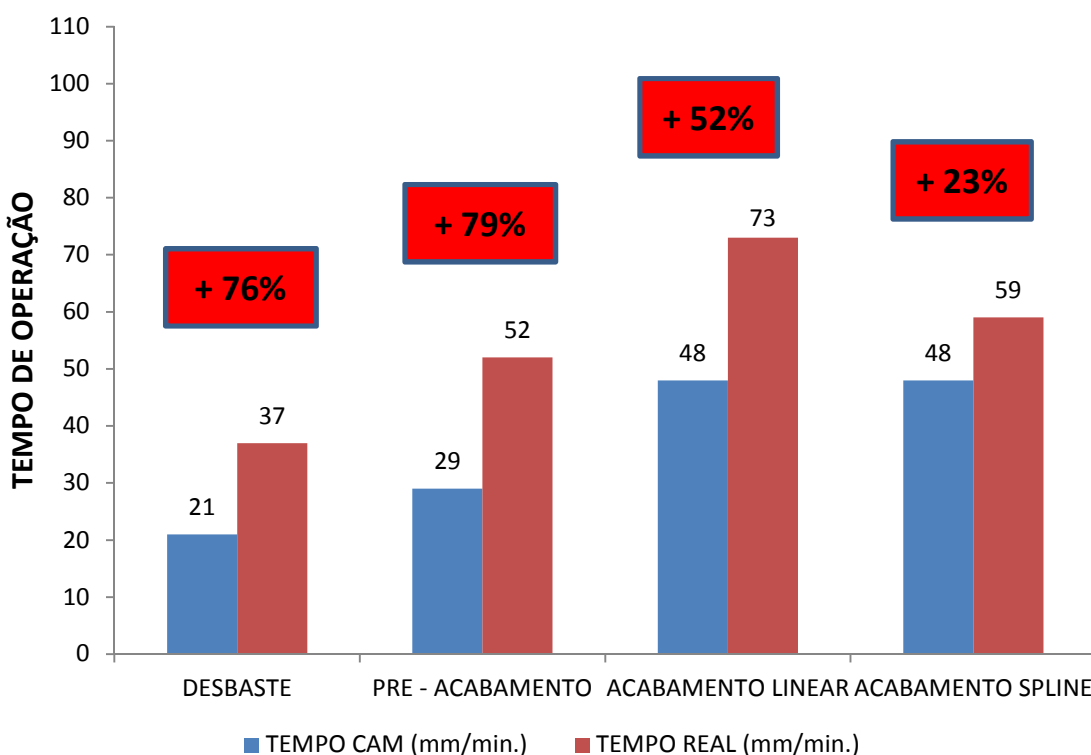


FIGURA 31: TEMPOS DE USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Outro fator que deve ser explanado é a faixa de tolerância CAM, a qual possui influencia direta no tipo de Interpolação utilizado.

Nos ensaios, a faixa utilizada pelo sistema CAM foi de 0,0025 mm, apresentando um efeito significativo para a Interpolação Linear. Segundo autores citados no referencial bibliográfico, o tempo de usinagem aumenta com a redução da tolerância no Sistema CAM, ou seja, a maior segmentação da trajetória da ferramenta resulta num aumento do tempo de usinagem.

Quanto maior for à segmentação da trajetória da ferramenta, maior será o número de linhas do programa NC e conseqüentemente maior será o tempo que o CNC irá exigir para processar a quantidade de blocos do programa.

Na Interpolação *Spline* a variação da faixa de tolerância CAM causa um impacto menor devido aos segmentos de curvas se ajustarem na redução de tolerância.

5.2. EXATIDÃO GEOMÉTRICA

Apesar da geometria do corpo de prova ser única para todos os ensaios de usinagem, a representação da trajetória da ferramenta proporciona variação na exatidão geométrica de cada modelo.

Os valores apresentados a seguir, são resultantes da soma dos desvios de exatidão individuais dos eixos X, Y e Z, obtidos através da medição dos corpos de prova e comparados com o modelo CAD.

Em função disso, foi analisada a exatidão e o desvio geométrico dos corpos de prova usinados com a Interpolação Linear e Interpolação *Spline*.

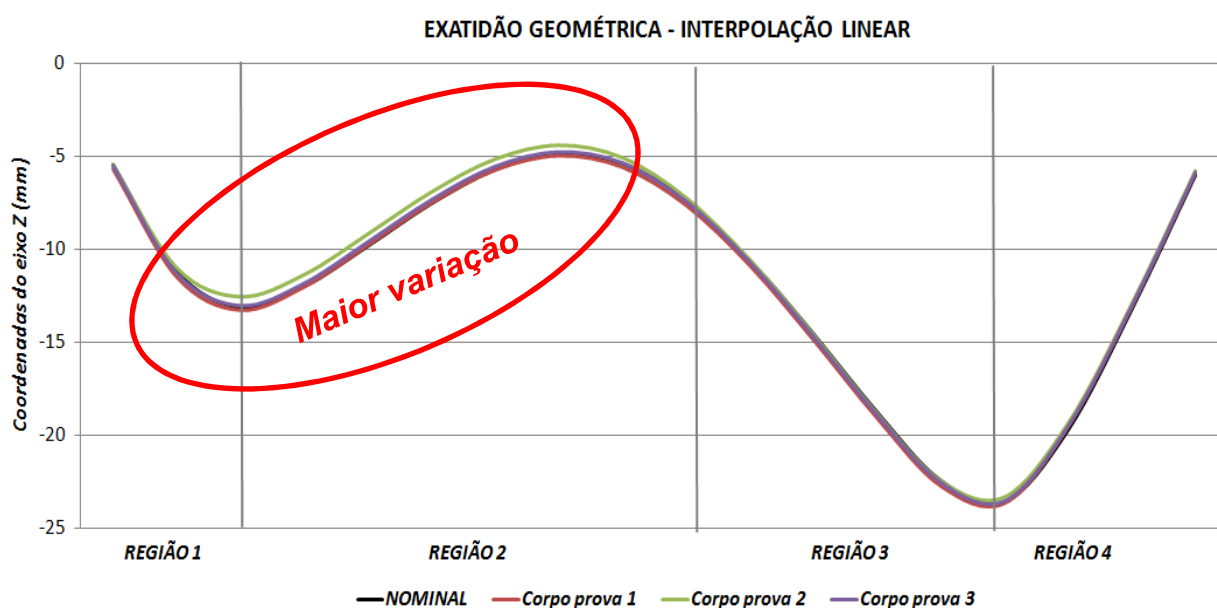


FIGURA 32: EXATIDÃO GEOMÉTRICA DO CORPO DE PROVA COM INTERPOLAÇÃO LINEAR

Através da figura 32 é possível observar que:

- As regiões 1 e 2 foram as que apresentaram a maior variação dispondo de uma geometria deslocada no sentido positivo em relação ao modelo CAD.
- A interpolação linear apresentou uma tendência de redução dos erros resultantes entre as regiões 3 e 4.
- Pode se observar que os corpos de prova 1 e 3 demonstram uma tendência de estabilidade e poucas variações de amplitude com relação a exatidão geométrica.
- O corpo de prova 2 apresentou menor estabilidade e maior variação de amplitude, podendo ser justificado pelo desgaste da ferramenta de acabamento.

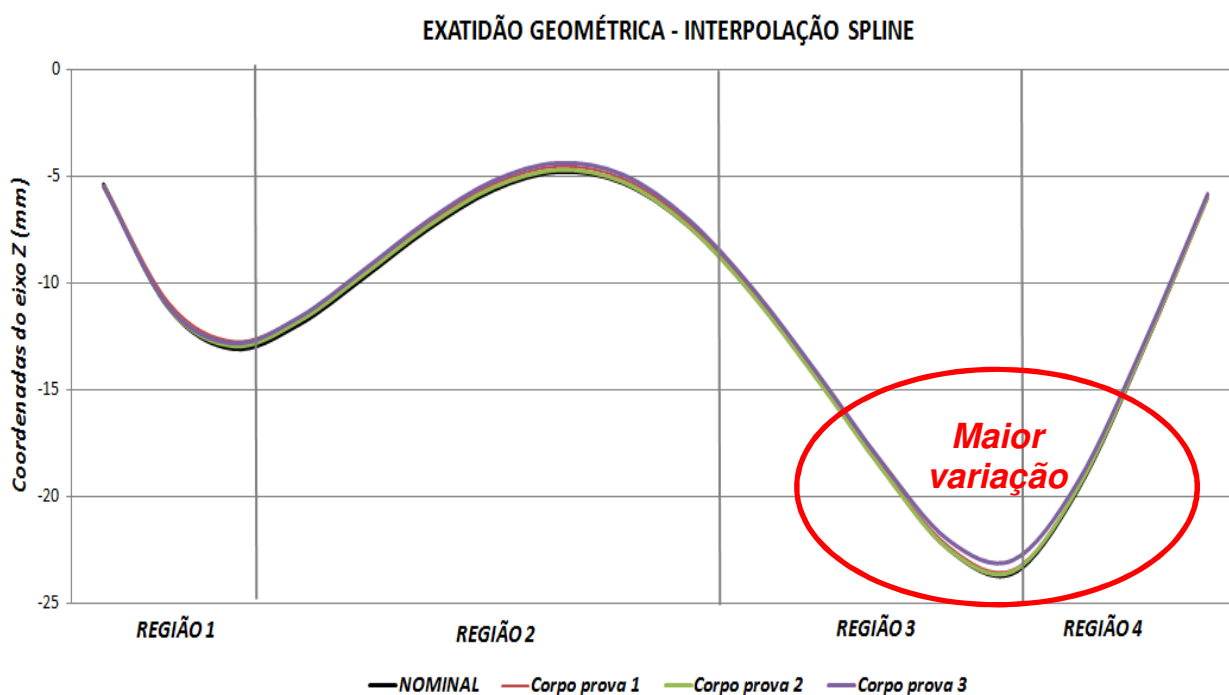


FIGURA 33: EXATIDÃO GEOMÉTRICA DO CORPO DE PROVA COM INTERPOLAÇÃO SPLINE

Através da figura 33 é possível observar que:

- As regiões 2 e 3 foram as que apresentaram a maior variação dispondo de uma geometria deslocada no sentido positivo em relação ao modelo CAD.
- A interpolação *Spline* apresentou uma tendência de redução dos erros resultantes entre as regiões 1 e 4.
- Pode se observar que os corpos de prova 1 e 2 demonstram uma tendência de estabilidade e poucas variações de amplitude com relação a exatidão geométrica.
- O corpo de prova 3 apresentou menor estabilidade e maior variação de amplitude, podendo ser justificado pelo desgaste da ferramenta de acabamento.

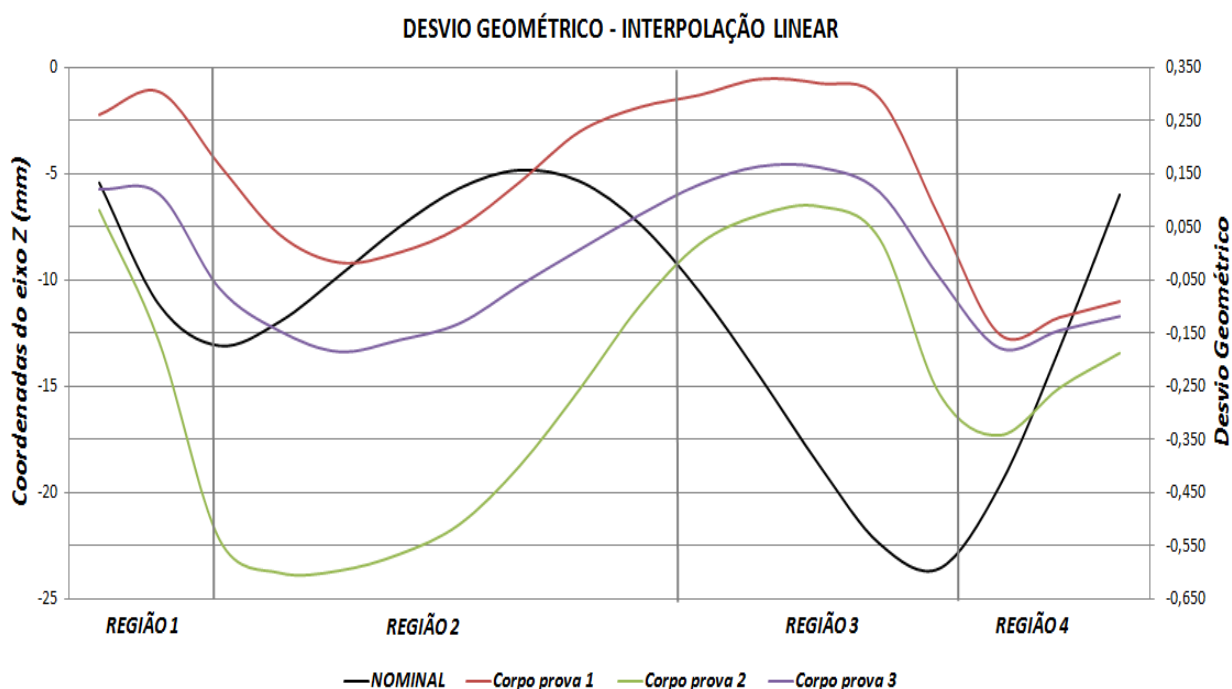


FIGURA 34: DESVIO GEOMÉTRICO DO CORPO DE PROVA COM INTERPOLAÇÃO LINEAR

Através da figura 34 é possível observar que:

- O maior desvio geométrico encontrado na Interpolação Linear foi no corpo de prova 2, variando entre -0,600 e 0,087 mm.
- O desvio geométrico dos corpos de prova 1 e 3 são respectivamente -0,153 e 0,327 mm e -0,184 e 0,163 mm, representando uma melhor estabilidade durante o processo.
- A região 2 foi a que apresentou o maior desvio negativo (-0,600 mm) em contrapartida a região 4 foi a que apresentou o maior desvio positivo (0,327 mm).
- A média dos desvios geométricos dos corpos de prova 1, 2 e 3 usinados com a Interpolação *Spline* foram -0,266 e 0,189 mm, totalizando uma variação de 0,455 mm.

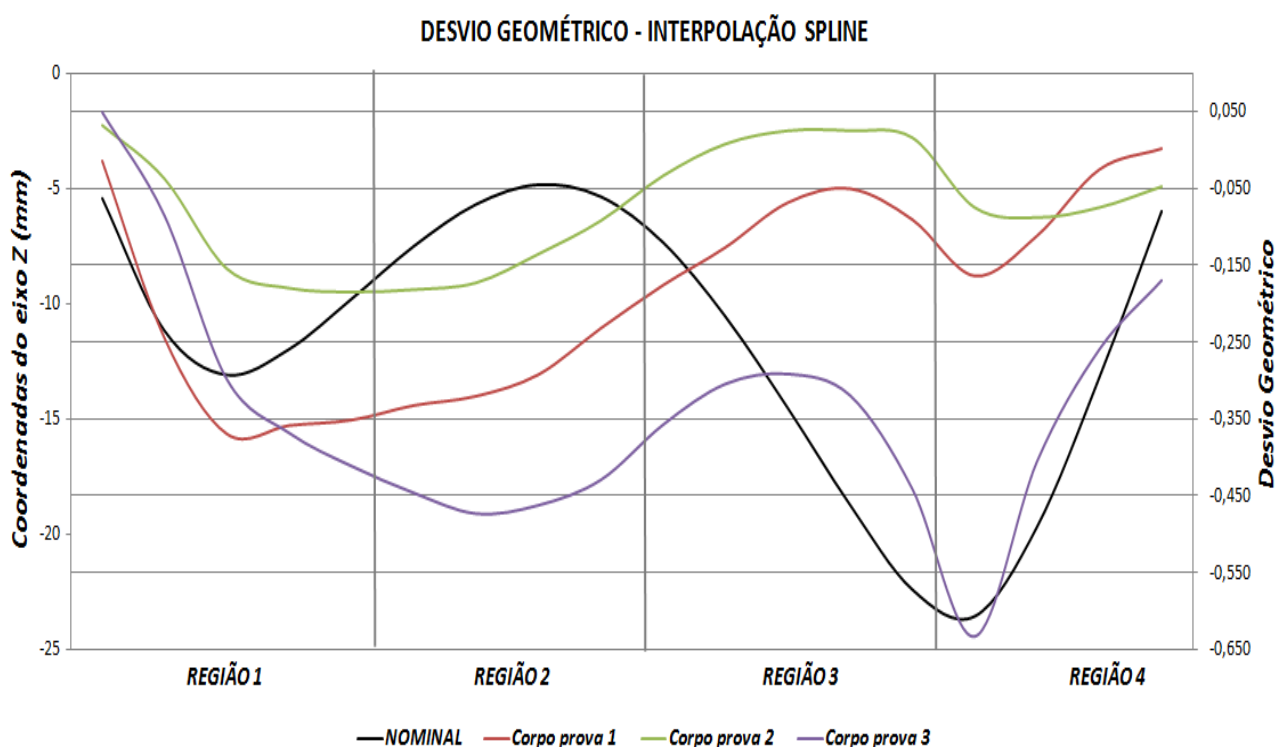


FIGURA 35: DESVIO GEOMÉTRICO DO CORPO DE PROVA COM INTERPOLAÇÃO SPLINE

Através da figura 35 é possível observar que:

- O maior desvio geométrico encontrado na Interpolação Spline foi no corpo de prova 3, variando entre -0,634 e 0,049 mm.
- O desvio geométrico dos corpos de prova 1 e 2 são respectivamente -0,369 e 0,001 mm e -0,184 e 0,031 mm, representando uma melhor estabilidade durante o processo.
- A região 4 foi a que apresentou o maior desvio negativo (-0,634 mm) em contrapartida a região 1 foi a que apresentou o maior desvio positivo (0,049 mm).
- A média dos desvios geométricos dos corpos de prova 1, 2 e 3 usinados com a Interpolação *Spline* foram -0,322 e 0,022 mm, totalizando uma variação de 0,344 mm.

5.3. ASPECTO SUPERFICIAL

Além da medição da exatidão geométrica, foi realizada uma comparação de aspecto superficial em cada face dos corpos de prova.

A Figura 36 e 37 ilustra detalhes característicos dos aspectos superficiais deixados pelos diferentes tipos de Interpolação aumentado 10 x.



FIGURA 36: ASPECTO SUPERFICIAL CORPO DE PROVA USINADO COM A INTERPOLAÇÃO LINEAR.



FIGURA 37: ASPECTO SUPERFICIAL CORPO DE PROVA USINADO COM A INTERPOLAÇÃO SPLINE.

Através da figura 36 e 37 é possível observar que:

- A Interpolação *Spline* mostra uma melhor uniformidade dos sulcos da superfície usinada em relação à Interpolação Linear.
- A Interpolação *Spline* apresenta uma baixa rugosidade em relação à Interpolação Linear, que por sua vez apresentou marcas de ferramenta de corte mais visíveis.

Essa variação no acabamento superficial se torna fundamental para a redução do processo do polimento, operação que será subsequente à usinagem CNC.

Quanto menor for o grau de rugosidade dos moldes após a usinagem CNC, menor será o tempo de polimento, que por sua vez, é uma operação manual, onde o tempo de execução está diretamente ligado à habilidade do polidor e a quantidade de material necessário ser retirado para a superfície do molde se tornar espelhado, condição ideal para o processo de injeção de plásticos.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por meio da pesquisa bibliográfica foi possível evidenciar a importância da metodologia de representação da trajetória da ferramenta em um processo de manufatura de moldes para injeção de plásticos.

Com isso, o estudo teórico abrangendo as metodologias de Interpolação Linear e *Spline* sobre o acabamento resultou numa apropriação de conhecimento técnico para a manufatura dos corpos de prova.

Assim, como foi explanado nas Figuras 34 e 35, a interpolação *Spline* com a faixa da tolerância CAM de 0,0025 mm resultou em um acabamento com mais baixa rugosidade em relação à interpolação Linear com a mesma faixa de tolerância na superfície do corpo de prova.

Essa variação no aspecto superficial deve-se principalmente aos erros inerentes do processo de fabricação, desde a exatidão da máquina ferramenta até o balanceamento da porta ferramenta.

No entanto, pode-se observar que em decorrência de seu comportamento dinâmico na máquina-ferramenta, a interpolação *Spline* apresenta um desvio de exatidão geométrica inferior em relação às interpolações Linear, na média de todos os corpos de prova.

Em virtude disso, a tolerância CAM utilizada na geração da trajetória da ferramenta apresenta comportamentos distintos sobre essas metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta.

Na interpolação Linear a tolerância CAM resulta num aumento significativo do tempo de usinagem e aumento do desvio da exatidão do modelo geométrico real x CAD. Na interpolação *Spline* a variação dessa tolerância causa impactos menores no aspecto superficial, exatidão e tempo de usinagem.

Com isso, tem-se que:

- A interpolação *Spline* demonstrou ser uma metodologia mais exata, principalmente com a faixa da tolerância CAM utilizada.
- A geração de segmentos de retas com tamanhos inferiores ao segmento mínimo estabelecido pelo tempo de processamento da máquina-ferramenta e o aspecto superficial “faceteado” em superfícies complexas faz com que a Interpolação Linear torne-se uma limitação a ser analisada no processo de manufatura de moldes para a injeção de plásticos.
- A interpolação *Spline* surge como uma alternativa para a manufatura de moldes para a injeção de plásticos, em virtude do seu bom desempenho relacionado ao tempo de usinagem, exatidão geométrica a aspecto superficial, quando comparada com a Interpolação Linear.
- Sendo assim, a utilização da Interpolação *Spline* também ocasionará ganhos na etapa de polimento, diminuindo seu tempo de realização.

Após a finalização desse trabalho, a principal sugestão para um próximo trabalho seria analisar a influencia da escolha dos tipos de interpolações em superfícies com grau de curvaturas diferentes, e medir, com um sistema tridimensional, os pontos da superfície na condição de que quanto menor for à curvatura, maior deve ser a concentração do numero de pontos, aumentando assim a precisão exatidão geométrica.

Outro fator que também pode ser abordado em trabalhos futuros é a influência do comportamento dinâmico da máquina-ferramenta sobre a exatidão da geometria real.

Por fim, sugere-se o estudo de novas metodologias que, juntamente com a Interpolação *Spline* influenciem de maneira positiva a fase do polimento, etapa

critica do processo de manufatura de moldes para a injeção de plástico, buscando sempre a redução dos tempos e aumento da qualidade superficial dos moldes para a injeção de plásticos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alberti, M. et al. (2011); Design of a decision support system for machine tool selection based on machine characteristics and performance tests. The International Journal of Manufacture, Issue 15, Pages 263-277.

Altan-T; Lilly-B; Yen-Yc. (2001); Manufacturing of Dies and Molds In: Cirp-Annals- Manufacturing-Technology - Eng. Res. Ctr. For Net Shape Mfg. Ohio State University, Columbus, Oh, United States v. 50 n. 2, pp. 405-423.

Arnone, Miles. A High Performance Machining. (1998); USA, Cincinnati: Editora Hanser Gardner Publications. ISBN 1-56990-246-1.

Bedworth, D. D.; Henderson, M.R.; Wolpe, P.M. (1991); Computer Integrated Design and manufacturing. USA, New York: McGraw-Hill. ISBN 0-07-100846-2.

Beiss, P. Et Al. (Eds) (2009); In: 8th Internat'l Conf. on Tooling.; Tool steel quality and surface finishing of plastic molds Aachen, Germany: RWTH Aachen University.

Besanko, D., et al. (2004); Economics of Strategy, 3^a ed., New York.

Brecher, C.; Lange, S.; Merz, M.; Niehaus, F.; Wenzel, C. (2006); Winterschladen, M. NURBS Based Ultra-Precision Freeform Machining. In: Annals of the CIRP, v. 55/1, p. 547 – 550.

Brinksmeier, E.; Autschbach, L. (2004); Ball-end milling of Freeform Surfaces for Optical Mold Inserts. Proc. 19th Ann. Meeting ASPE.

Choi, B.K.; Jerard, R.B. (1998); Sculptured Surface Machining - Theory and applications. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 368 p. ISBN 0- 412-78020-8.

Choi, Y.K.; Banerjee A. (2007) Tool path generation and tolerance analysis for free-form surfaces. International Journal of Machine tools & Manufacture, v. 47, p. 689- 696.

Coelho, R. T.; Souza, A. F. (2003) Tecnologia CAD/CAM - Definições e estado da arte visando auxiliar sua implantação em um ambiente fabril. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 23, Anais... Ouro Preto: UFOP.

Coelho, R. T.; Souza, A. F.; Roger, A. R.; Rigatti, A. Y.; Ribeiro, A. A. L. (2010) Mechanistic approach to predict real machining time for milling freeform geometries applying high feed rate. Int. J. Adv. Manuf. Technol. v. 46, p.1103 – 1111.

Costa, C. A.; Zeilmann, R. P.; Schio, S. M. (2004); Análise de Tempos de Preparação em Máquinas CNC. In: O Mundo da Usinagem. São Paulo, v.4, p. 20 – 25.

Daniel, A. (2001); High Speed Machining in the practice of the Tool and Mould making industry. In: VI Seminário internacional da alta tecnologia. Piracicaba, P. 153 – 190.

FEIMAFE (2013). Feira Internacional de Máquinas Ferramentas e Sistemas Integrados de Manufatura. Disponível em <http://www.feimafe.com.br/A-Feira/Post-Show-Report/>, último acesso em 19 de Janeiro de 2013.

Fallbohmer, P., Rodriguez, C.A., Ozel, T., Altan, T., (2000), “Journal of Material Processing Technology” High Speed Machining of Cast Iron and Alloy for Die and Molds Manufacturing V98, pp104 -115.

Gaither, N. Frazier, G. Tradução: Santos, J. C. B. (2002); Administração da Produção e Operações. 8. Ed. São Paulo, Ed. Thomson. ISBN 85- 221-0237-6.

Gologlu, C.; Sakarya, N. (2008); The effects of cutter path strategies on surface roughness of pocket milling of 1.2738 steel based on Taguchi method. Journal of Materials Processing Technology. v. 206, p. 7-15.

Guo X. Et al. (2006); A study of a universal NC program processor for a CNC system. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Volume 36, Numbers 7-8, 738-745.

Helleno, A. L. (2004) Investigação de Métodos de Interpolação para Trajetória da Ferramenta na Usinagem de Moldes e Matizes com Alta Velocidade. Dissertação. Universidade Metodista de Piracicaba, Março.

Henriques, J. R. (2004); Contribuição para a Otimização da Troca de dados Geométricos entre Sistemas CAD Utilizando Processadores STEP AP 214. Dissertação. Universidade Metodista de Piracicaba.

Heo, E. Y.; Kim, D. W.; Kim, B. H.; Chen, F. F. (2006) Estimation of NC machining time using NC block distribution for sculpture surface machining. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. v. 22, p. 437 – 446, 2006.

Hu, H.; Zhang, X. T. (2009); An Adaptive Real-time NURBS Interpolator for CNC Machine Tools. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Suntec Convention and Exhibition Center. Singapore, July 14-17, 2009.

Jee, S.; Koo, T. (2003); Tool-Path Generation for NURBS Surface Machining. Proceedings of the American Control Conference. Denver, v. 3, p. 2614 – 2619.
Jiang, X.; Scott, P.; Whitehouse, D. (2007); Freeform Surface Characterisation – A Fresh Strategy. In: Annals of the CIRP, v. 56, p. 553 – 556.

Koenig, D. T. (1994); Manufacturing Engineering: Principles for Optimization. 2nd ed. Ed. Taylor & Francis. 415p., ISBN 1-56032-301-9.

Langeron, J.M., Duc, E., Lartigue, C., Bourdet P. (2004); A new format for 5-axis tool path computation using BSpline curves, Computer-Aided Design, 36:1219-1229.

Lartigue, C.; Thiebaut, F.; Maekawa, T. (2001); CNC tool path in terms of B-Spline curves. Computer Aided Design, v. 33, p. 307-319.

Lartigue, C.; Tournier, C.; Ritou, M.; Dumir, D. (2004); High performance NC for HSM by means of Polynomial Trajectories. In: Annals of the CIRP, v. 53, n. 1.

Lasemi, A.; Xue, D.; Gu, P. (2010); Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. In: Computer Aided Design. v42, p. 641 – 654.

Mahon, Mc.; Browne, J. (1993) Cad/Cam from Principles to Practice. UK, Suffolk: Addison-Esley, 1993. 508 p. ISBN 0-201-56502-1

Marshall S.; Griffiths J. G. (1994); A survey of cutter path construction techniques for milling machines. International Journal of Production Research. v.32(12), p. 2861 – 2877.

Marson, D. (2009); Filão de moldes aberto para exploração - Revista Máquinas e Metais, nº524, p. 30 - 49, edição setembro.

McMahon, C.; Browne, J. (1999); CAD/CAM Principles, Practice and Manufacturing Management. 2ª ed., ISBN 0-201-56502-1.

Mesquita R.A., Barbosa, C.A. (2005), Desenvolvimento de Aço com Usinabilidade Melhorada e Aços Endurecíveis por Precipitação para Moldes de Plástico. Tecnologia em Materiais. São Paulo, v.1, n.4, p.11 – 14 – 15, abr. – jun. 2005.

Mesquita, R. A.; Barbosa, C. A. (2007); Os aços para moldes de plástico devem ser muito bem caracterizados. Máquinas e Metais, n. 499, p. 68-91.

Mesquita, R. A., Schneider, R. S. E. (2010); Tool steel quality and surface finishing of plastic molds. Exacta (São Paulo. Impresso), v.8, p.307 – 318.

Min-Ho, C; et al. (2009); Case-based impeller machining strategy support system. Journal Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, March; Pages 980–988.

Monaro, R. A.; Helleno, A. L. (2010); Desenvolvimento de um índice de desempenho dinâmico (IDDyn) para avaliação da estratégia de usinagem em

máquinas-ferramentas. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande.

Moreira, J. (2003); Tecnologia CNC para usinagem a alta velocidade. Máquina e Metais, São Paulo, v. 39, n. 446, p. 148 - 159, edição março.

Olling, G.; Choi, B.K.; Jerard, R.B. (1999); Machining Impossible Shapes. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 386 p. ISBN 0-07-100846-2.

Pachione, R. (2010); Vendas aquecidas fortalecem indústria nacional contra Ásia. Revista Plástico Moderno, nº431, edição setembro.

Pessoles, X.; Tournier, C. (2010); Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center. Journal of Materials Processing Technology. Cachan, France.

Piegl, L.; Tiller, W. (1997); The NURBS Book. Germany, Ed. Springer. ISBN 3-540-61545-8.

Ponce, A. (2010); A complexidade de um Simples Molde. Revista Máquinas e Metais. São Paulo, p. 28 – 43, edição julho.

Ribeiro, J. F.; Godoy, A. F.; Vieira Jr, M. (2003); A Integração de Tecnologias Avançadas de Manufatura em Ambiente de Ensino de Engenharia. In: XXIII Encontro Nacional De Engenharia De Produção, Ouro Preto, MG.

Rodrigues, M. A. (2010); Não culpe o CAM pelo tempo perdido na usinagem. Máquinas e metais, São Paulo, v. 46, n. 529, p. 128 – 131. Edição fevereiro.

Rogers, D. F. (2001); An Introduction to NURBS: with historical perspective. USA, Morgan Kaufman Publishers, 321p. ISBN 1-55860-669-6.

Sandvick Coromant (2002); Fabricação de Moldes e Matrizes, Ferramentas e Métodos, edição maio.

Sant'anna, J.P. (2010); Softwares reduzem tempo de usinagem e conquistam atenção das ferramentarias – Revista Plástico Moderno, nº429, edição julho.

Savio, E.; Chiffre, L. (2007); Schmitt, R. Metrology of Freeform Shaped Parts. In: Annals of the CIRP, v. 56/2.

Schimidt, J; Huntrop, (2000); V. O Grande Potencial da Microusinagem. Maquinas e Metais. nº 434, pp. 44-57, edição março.

Schützer, K. et al. (2003); Usinagem em Altíssimas Velocidades. São Paulo: Editora Érica. 214 p.

Schützer, K.; Helleno, A. L. (2003) Programming and Data Transmission in HSC Technology. In: High-Speed Machining – How the concepts of HSM/HSC can revolutionize the metal-mechanics industry. São Paulo: Editora Érica, p. 148-179.

Schützer, K.; Helleno, A. L. (2005); A importância do recurso de associatividade entre os sistemas CAD/CAM para a geração do programa NC. In: O Mundo da Usinagem. N. 23. p. 26 – 32. ISSN 1518-6091.

Simon, A. T. (2009); X Inventário MM: panorama do parque nacional de máquinas-ferramenta de usinagem, Revista Máquinas e Metais.

Souza, A. F. (2001); Análise das interpolações de trajetórias de ferramenta na usinagem HSC (High Speed Cutting) em superfícies complexas. Universidade Metodista de Piracicaba. Dissertação de Mestrado.

Souza, A. F.; Coelho, R. T. (2003); Tecnologia CAD/CAM - Definições e estado da arte visando auxiliar sua implantação em um ambiente fabril. XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção. Ouro Preto, MG. Brasil.

Souza, A. F. (2004); Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicado a tecnologia de usinagem com altas velocidades. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - EESC-USP.

Souza, A. F.; Ulbrich, C. B. L. (2009); Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC – Princípios e Aplicações. São Paulo. Ed. Artliber.

Sriyotha P.; Nakamoto, K.; Sugai, M.; Yamazaki K. (2006); Development of 5-axis Linear Motor Driven Super-Precision Machine. In: Annals of the CIRP, v. 55, n.1.

Stroh C.; Abele, E. (2005); NURBS based Tool Path generation. In: X Seminário Internacional de Alta Tecnologia. Piracicaba. p. 49-68.

Toh, C. K. (2004) A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling. Journal of Materials Processing Technology, v.152, p. 346-356.

Villares Metals (2012); Catálogo do aço VP Atlas.

Waiwai, Wang. (2009); Finite Element Analysis of Dynamic Characteristic for the XK717 CNC Milling Machine. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, IEEE Computer Society.

Werner, A. et al. (2000); Design and manufacturing of anatomical hip joint endoprostheses using CAD/CAM systems. Journal of Material Processing Technology, v. 107, p. 181-186.

Wu, Chi-haur; Xie Yujun. (2010); Linking product design in CAD with assembly operations in CAM for virtual product assembly. paper presented at 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, September.

Ye, Zhen-Hong et al (2008); Research and Improve Operating Efficiency of the Model Numerical Control Processing Program. Light Industry Machinery, June, Vol. 26, n^o3, Pages 86-89.

Youjiang, W; et al. (2010); The research of CNC machine appearance design based on evolution theory. January, Pages 875 - 879.

Yurdakul, M., & Tansel, Y. (2009); Analysis of the benefit generated by using fuzzy numbers in a TOPSIS model developed for machine tool selection problems. Journal of Materials Processing Technology, p.310–317.

Zelinski, P. (2003) Understanding NURBS interpolation. Disponível em: <http://www.mmsonline.com/articles/079901.html>. Acesso em: 10 de agosto 2012.

Zhigang, C. et al. (2009); Research on CAD/CAM/CNC system for thin-walled part made of light metal based on spherical coordinate. Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, Novembro.